

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VOLBA PARAMETRŮ DRSNOSTI POVRCHU PRO KVALITATIVNÍ HODNOCENÍ
LEŠTĚNÝCH TITANOVÝCH LOPATEK LETECKÉHO MOTORU

SELECTION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS FOR QUALITATIVE
EVALUATION OF POLISHED TITANIUM BLADES OF AIRCRAFT ENGINE

AUTOR: Erik Bóna

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Urban

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bóna** Jméno: **Erik** Osobní číslo: **470029**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Volba parametrů drsnosti povrchu pro kvalitativní hodnocení leštěných titanových lopatek leteckého motoru

Název bakalářské práce anglicky:

Selection of surface roughness parameters for qualitative evaluation of polished titanium blades of aircraft engine

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše dostupných měřicích systémů pro přesné vyhodnocení drsnosti povrchu
2. Definice parametrů profilu povrchu a uvedení jejich významu pro praxi
3. Volba vhodných parametrů drsnosti povrchu pro věrohodné porovnání přínosů procesu leštění povrchu lopatek.
4. Experimentální měření na vybraných površích

Seznam doporučené literatury:

Dostupné vědecké publikace z databáze knihovny ČVUT

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

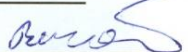
Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



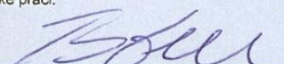
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

10.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá měřením drsnosti a profilu povrchu leštěných titanových lopatek leteckého motoru. Měření je vyhodnoceno pomocí přístroje Mahr LD 120. Úvod práce slouží k přiblížení základní problematiky měření drsnosti a popis základních přístrojů a nástrojů, které se používají. V dalších částech jsou rozepsané základní parametry drsnosti a jejich využití v praxi. Hlavním cílem této bakalářské práce je vybrat vhodné parametry pro vyhodnocení povrchu lopatek po leštění a vyhodnotit, jestli v procesu leštění dochází ke zlepšení povrchu, tím pádem k zvýšení výkonu lopatkových kol, aniž by součást musela být konstrukčně upravena. Experimentální měření, které potvrdí nebo vyvrátí tyto skutečnosti je vypracováno v závěru práce.

Klíčová slova

Lopatky, Titan, Měření drsnosti povrchu, Leštění

Annotation

This bachelor thesis deals with measurement of surface roughness and profile of polished titanium blades of aircraft engine. The measurement is evaluated using the Mahr LD 120 instrument. The introduction serves to explain the basic issues of roughness measurement and to describe the basic instruments and tools that are used. In the following parts the basic roughness parameters and their use in practice are described. The main aim of this bachelor thesis is to select suitable parameters for the evaluation of the surface of the blades after polishing and to evaluate whether during the polishing the surface is improved, thus increasing the power of the paddle wheels without the component having to be modified. Experimental measurements, which confirm or disprove these facts, are drawn up at the end of the thesis.

Keywords

Blades, Titanium, Surface Roughness Measurement, Polishing

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Janu Urbanovi za užitečné konzultace a připomínky v odborném vedení mé bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Cíl.....	10
2	Měřicí systémy pro přesné vyhodnocení drsnosti povrchu	11
2.1	Metody měření drsnosti	11
3	Kontaktní a bezkontaktní měřicí přístroje	13
3.1	Kontaktní měřicí přístroje	13
3.1.1	Výhody kontaktních měřících přístrojů	15
3.1.2	Nevýhody kontaktních měřících přístrojů	15
3.2	Bezkontaktní měřicí přístroje	16
3.2.1	Výhody bezkontaktních měřících přístrojů.....	17
3.2.2	Nevýhody bezkontaktních měřících přístrojů.....	18
3.3	Srovnání kontaktní a bezkontaktní metody	18
4	Definice profilu povrchu a jeho parametrů	19
4.1	Základní pojmy popisující povrch.....	19
4.1.1	Struktura povrchu	19
4.1.2	Základní a vyhodnocovaná délka	20
4.1.3	Volba mezní vlnové délky	21
4.1.4	Filtrování profilu.....	22
4.1.5	P profil – základní profil	22
4.1.6	W profil – vlnitost povrchu	22
4.1.7	R profil – drsnost povrchu	23
4.2	Parametry profilu povrchu	24
4.2.1	Rozdělení základních parametrů profilu.....	24
4.2.2	Nejpoužívanější výškové parametry	25
4.2.3	Nejpoužívanější délkové parametry	32

4.2.4	Nejpoužívanější křivkové parametry	33
4.3	Vyhodnocení měření drsnosti	34
4.3.1	Pravidlo maxima	34
4.3.2	Pravidlo 16%	34
4.4	Chyby měření a jejich příčiny	35
4.5	Přehled norem ČSN	36
4.5.1	GPS - Termíny, definice a parametry sktruktury povrchu ČSN EN ISO 4287 – 1999.....	36
4.5.2	GPS - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu ČSN EN ISO 4288 – 1997	36
4.5.3	GPS - Jmenovité charakteristiky dotykových přístrojů ČSN EN ISO 3274 – 1997.....	37
4.5.4	GPS – Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti ČSN EN ISO 13565 – 1999.....	37
5	Titan	38
5.1	Vlastnosti titanu	38
5.2	Použití titanu v letectví	39
6	Experimentální měření	40
6.1	Leštění	40
6.2	Měřicí přístroj.....	41
6.2.1	Geometrie snímacího doteku	41
6.3	Popis měřených vzorků	43
6.3.1	Měření drsnosti na vybraných površích lopatek	44
6.4	Volba vhodných parametrů profilu povrchu.....	44
6.5	Vyhodnocení dílu 370 – kolo 1. stupně.....	45
6.6	Vyhodnocení dílu 167 – kolo 2. stupně.....	53
7	Závěr	62

8	Literatura	65
9	Seznamy	68
9.1	Obrázky	68
9.2	Tabulky	70
9.3	Zkratky	71
9.4	Přílohy	72

1 Úvod

Povrch leštěných titanových lopatek, leteckého motoru, který je tvořen různými drsnostmi, nerovnostmi a vlnitostmi má velký vliv na chování lopatek v praxi a v provozu. Všechny tyto vlastnosti jsou důležité pro funkčnost a životnost součástí. S dobou se postupně začínají zvyšovat výrobní požadavky jak na kvalitu povrchu, tak přesnost měřících přístrojů. Pro výrobce měřící techniky to znamená, že musí nabízet přístroje, které dokážou vyhodnotit více parametrů a jsou přesnější. Jedná se o dílenská měřidla, které umí změřit pět základních parametrů nebo o laboratorní a průmyslová měřidla s vyhodnocením až několika desítek parametrů.

1.1 Cíl

Moje bakalářská práce se zabývala obecným přehledem na téma volba parametrů drsnosti povrchu pro kvalitativní hodnocení leštěných titanových lopatek leteckého motoru. Hlavním cílem bakalářské práce bylo najít vhodný parametr drsnosti povrchu, který věrohodně hodnotí kvalitu leštěného povrchu. Kvalita leštěného povrchu ovlivňuje hlavně funkčnost a odolnost jednotlivých lopatek. Z toho vyplývalo, že může být procesu leštění využito ke zvýšení výkonu, aniž by se musela součást konstrukčně nebo rozměrově upravovat. První část byla věnovaná základním přístrojům a nástrojům pro vyhodnocení povrchu. Dále práce obsahuje přehled norem ČSN – Geometrické požadavky na výrobky (GPS). Tyto normy se zabývají různými odbornými definicemi, díky nimž bylo možné posuzovat strukturu povrchu a jeho charakteristiky. Největším přínosem práce byla experimentální část, kde probíhalo samotné měření. Při tomto měření se získaly informace potřebné k vyhodnocení a následnému určení vhodných parametrů povrchu.

2 Měřicí systémy pro přesné vyhodnocení drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchů je prováděno několika rozdílnými metodami. Pro každou metodu jsou určeny specifické přístroje, nástroje, podmínky etalony nebo samotné lidské smysly. [1]

2.1 Metody měření drsnosti

Kvalitativní měření je zkoumání a hodnocení drsnosti povrchu pomocí lidských smyslů. Jde o porovnávání konkrétního povrchu s etalonovými plochami hmatem, zrakem nebo vizuálně pomocí jednoduchých optických pomůcek (komparační mikroskopy, lupy). Spolehlivost této metody je omezena rozlišovací schopností lidských smyslů a fyzikálními vlastnostmi použitých pomůcek (mikroskopy). Rozlišovací schopnost oka každého člověka je různá, ale většinou se udává číslo 40 μm . Pokožkou bříška prstu ruky lze u dvou ploch obrobených stejným způsobem rozlišit rozdíl v drsnosti až $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. [2]

Kvantitativním měřením se porovnává kontrolovaná plocha se vzorovou plochou. Používají se komparační měřidla, které mají různé fyzikální principy. Drsnost povrchu vyhodnocená pomocí kvantitativních metod je vyjádřena parametry R_a a R_z . Pro vyhodnocení drsnosti povrchu se například používají pneumatické komparátory, elektrické komparátory nebo fotoelektrické komparátory. Výsledkem této metody je soubor odchylek povrchu od nulové hodnoty komparátoru. [2]

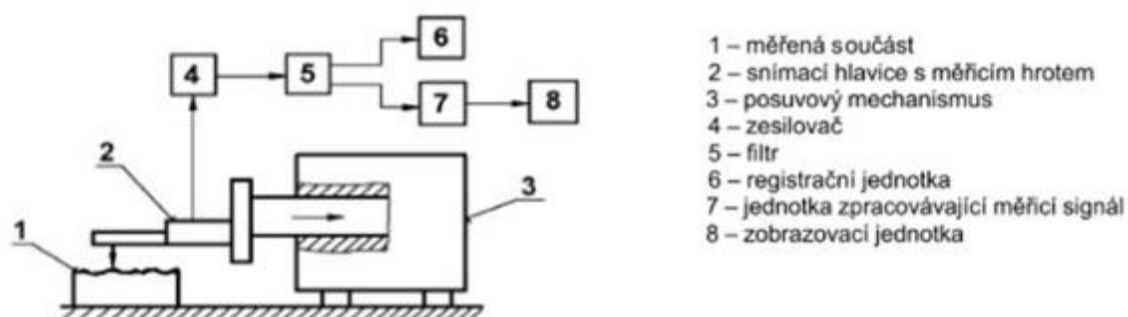
Dotykové měření na profiloměru je nejrozšířenější a nejdokonalejší metodou používanou pro vyhodnocení drsnosti povrchu. Principem tohoto měření je rovnoměrné posouvání měřicího hrotu po kontrolovaném povrchu. Měřicí hrot má nejčastěji úhel 60° a poloměr špičky 2 μm . Výškové změny měřicího hrotu způsobené nerovnostmi povrchu se zaznamenávají velmi citlivým indukčním, případně piezoelektrickým snímačem v měříku 1:1. Zvětšení změřeného povrchu má na starosti počítačový software. [2]

Měření na bezdotykovém profiloměru je založeno na chromatické vadě. Chromatická vada je barevná vada čočky nebo složitější optické soustavy. Příčinou je závislost ohniskové délky optiky na vlnové délce světla. [3]

3 Kontaktní a bezkontaktní měřicí přístroje

3.1 Kontaktní měřicí přístroje

Kontaktní přístroje mají většinou diamantový hrot s 60° úhlem a poloměrem špičky $2\text{ }\mu\text{m}$. Diamantový snímací hrot jezdí po povrchu profilu a snímá souřadnice, které jsou vyhodnoceny počítačem. Zaznamenávají se souřadnice vzdálenosti na úhlu snímače. Kontaktní metoda je nejdéle používaná metoda pro vyhodnocení povrchu. [9]



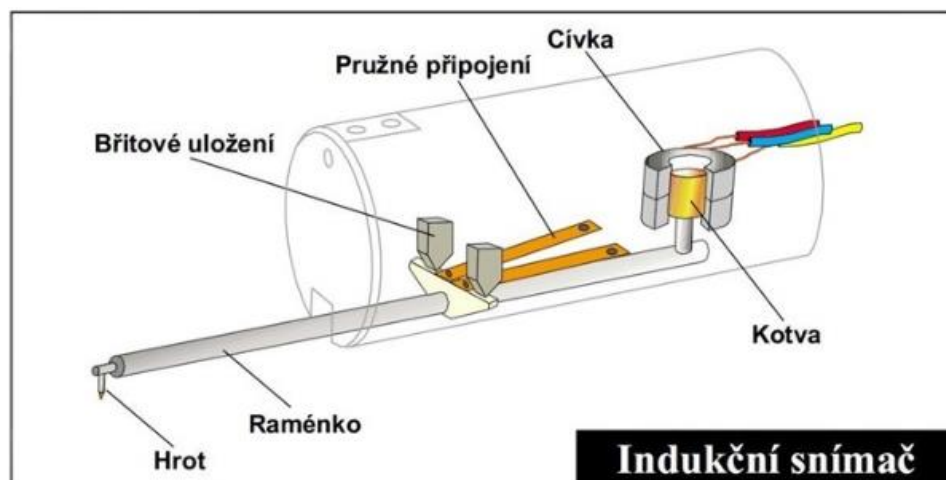
Obr. 1: Schéma kontaktního snímání povrchu [12]

Kontaktní přístroj se skládá ze dvou částí:

b) Mechanická část se skládá ze stolku, snímací hlavice a snímacího hrotu. Na stůlek se umísťuje měřená součást. Do snímací hlavice je umístěn snímací hrot, který snímá povrch profilu. Rychlost snímací hlavice lze libovolně nastavit, ale platí, že čím rychleji se snímač po povrchu pohybuje, tím více klesá přesnost vyhodnocení. Nejpoužívanější rychlost je okolo 1 mm/s. [9]

a) Elektronická část je určena k převodu mechanického signálu na elektrický signál. Mechanický signál je vytvářen při pohybu snímacího hrotu po povrchu. [9]

Pohyb snímacího hrotu musí být přesný jak v přímosti, tak v rovnoměrnosti. Rychlost je zvolena podle dynamických vlastností snímacího systému. Měření výstupků a prohlubní je zajištěno vertikálním pohybem měřícího hrotu. [9]



Obr. 2: Schéma indukčního snímače [12]

Výsledek měření ovlivňuje:

- a) Rychlost změny měřící síly. [9]
- b) Poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm). [9]
- c) Přítlačná síla (cca 0,00075 N). [9]
- d) Vrcholový úhel snímacího hrotu (600, 900). [9]

3.1.1 Výhody kontaktních měřících přístrojů

Při pohybu snímacího hrotu na povrchu profilu dochází k odstranění drobných nečistot, které se nacházejí v dráze měření. Díky tomuto jsou náhodné chyby měření minimalizovány, přesto je ale nutné mít měřené díly v čistotě. [19]

Lze měřit povrchy, které jsou v jakékoliv poloze (nemusí být pouze vodorovná). Uplatňuje se to například pro měření povrchu na kuželových plochách nebo jinak složitých tvarech. Musíme ale dávat pozor, aby byl měřený povrch v kontaktu s hrotem snímače, nikoliv s měřenou plochou. Ideální stav je, když kuželová část snímače je při měření kolmo k měřené ploše. Snímač nesmí překročit poloviční úhel kuželové části, jinak dojde k měření kuželovou plochou, nikoliv hrotem. [19]

Použití kontaktních měřících přístrojů je rozšířené, neboť exportovaná data těchto přístrojů jsou kompatibilní napříč jednotlivými měřícími stroji. [19]

3.1.2 Nevýhody kontaktních měřících přístrojů

Nejčastějším materiálem pro snímací hrot je diamant, který na svém vrcholu nemá špičku, ale malé zaoblení (rádius). Bohužel díky tomuto tvaru snímací hrot neměří celý povrch detailně, ale zaznamenává pouze dotykové body špičky a povrchu profilu. Z toho vyplývá, že přístroj může měřit jen nerovnosti, které jsou větší než průměr měřící špičky. Tento problém lze odstranit změnou měřícího principu, např. laserovým paprskem, ale ten už patří do bezkontaktní metody. [19]

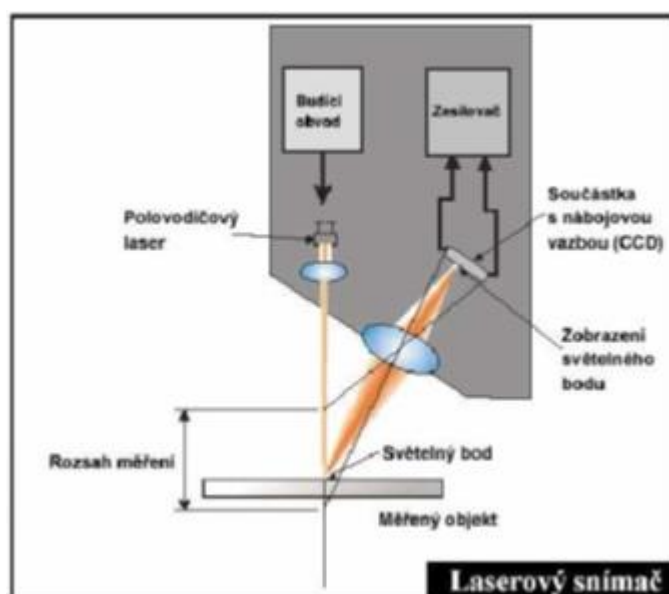
Další nevýhodou může být poškození měřeného povrchu diamantem. Na měřící hrot nemusí působit příliš velká přitlačná síla, ale pokud je měřený povrch z měkkého materiálu, tak diamantový hrot může tento materiál poškodit. Ještě větší problém vznikne u adhezních povrchů. Měřící hrot se může zachytit k měřenému profilu a následně poškodit celý přístroj. V takovém případě jsou už škody vysoké. [19]

3.2 Bezkontaktní měřicí přístroje

V laboratořích se dnes postupně začínají rozšiřovat bezkontaktní snímače. Hlavním důvodem je cenová dostupnost bezkontaktních přístrojů. Jsou to například laserové snímače nebo snímače CLA. Snímače CLA používají jednotky μm a laserové snímače používají jednotky o řád nižší. [9]

Princip laserového snímače:

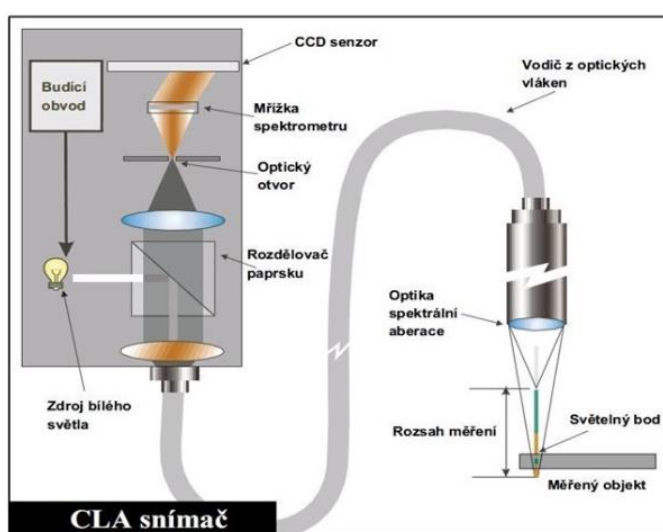
Paprsek polovodičového laseru se odrazí od měřeného povrchu profilu a následuje do přijímacího optického systému snímače. Dále je paprsek zaostřen na obrazovou matici. Obrazové prvky jsou použity ke zjištění polohy zaměřeného bodu. [12]



Obr. 3: Laserový snímač [12]

Princip CLA snímače:

Bílé světlo je rozkládáno a optikou směřováno na kontrolovaný povrch profilu. Optika rozloží světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka. Světlo, odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha, která je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. Na místo CLA snímačů je možné použít i snímače laserové. Ty však nejsou tak přesné jako snímače CLA. [9]



Obr. 4: Schéma CLA snímače [12]

3.2.1 Výhody bezkontaktní měřících přístrojů

Hlavní výhodou bezkontaktní metody je rychlost snímání povrchu. Ty nejvíce výkonné přístroje dokážou snímat až 400 řezů za 2 sekundy. [19]

Lze měřit i měkké a adhezivní materiály. [19]

Ke snímání se používá nejčastěji paprsek, tudíž odpadá problém se zkreslením výsledků, které vzniká u kontaktní metody (snímací hrot). [19]

Lepší vyhodnocení skrytých a nepravidelných ploch při měření. [19]

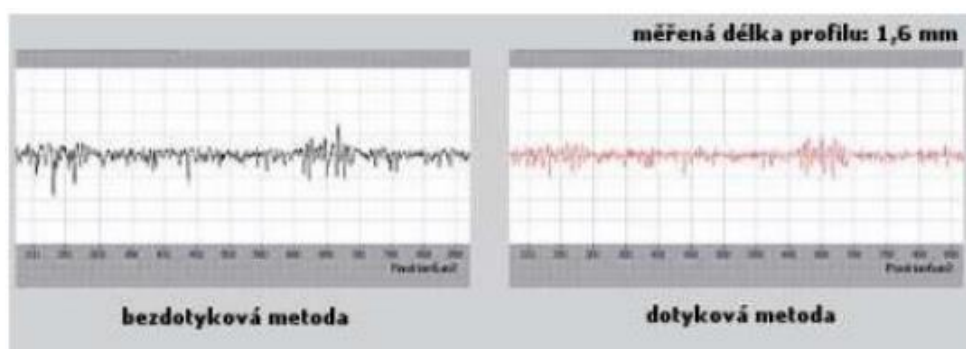
3.2.2 Nevýhody bezkontaktních měřících přístrojů

Hlavní nevýhodou je, že u této metody může docházet k výpadku naměřených dat. Týká se to zejména hran a koncových ploch profilů. Způsobuje to paprsek, který se od hrany odrazí špatně mimo přijímač, nebo se paprsek neodrazí vůbec. [19]

Další nevýhodou bývá vliv okolního prostředí. Může to být například světlo, které narušuje paprsek přístroje nebo okolní vibrace. [19]

3.3 Srovnání kontaktní a bezkontaktní metody

Při porovnání kontaktních a bezkontaktních přístrojů jsem došel k závěru, že obě metody mají nějaké výhody a nevýhody. U bezkontaktní metody, jak můžeme vidět na obrázku 5, je vyhodnocený povrch, na kterém jde vidět více nerovností a detailů. Bohužel je tato metoda velmi náročná na čistotu a stav povrchu. Z toho plyne vyšší výskyt náhodných chyb během měření. Naopak u kontaktní metody nelze dosáhnout takových detailů jako u bezdotykové metody, protože každý snímací hrot má určitou velikost průměru špičky, která se nedostane do všech prasklin. Dalším rozdílem obou přístrojů je rychlost a rozsah měření. Vyšší rychlost u bezkontaktních měřících přístrojů, na rozdíl od kontaktních měřících přístrojů, nijak neovlivňuje naměřené hodnoty. Co se týče rozsahu měření, tak u dotykové metody se měří pouze jeden řez, zato u bezdotykové metody celá plocha, což je velice přínosné. Je otázkou možností a požadavků, jestli použijeme bezkontaktní nebo kontaktní přístroje. [10]



Obr. 5: Porovnání profilu drsnosti kontaktní a bezkontaktní metodou [10]

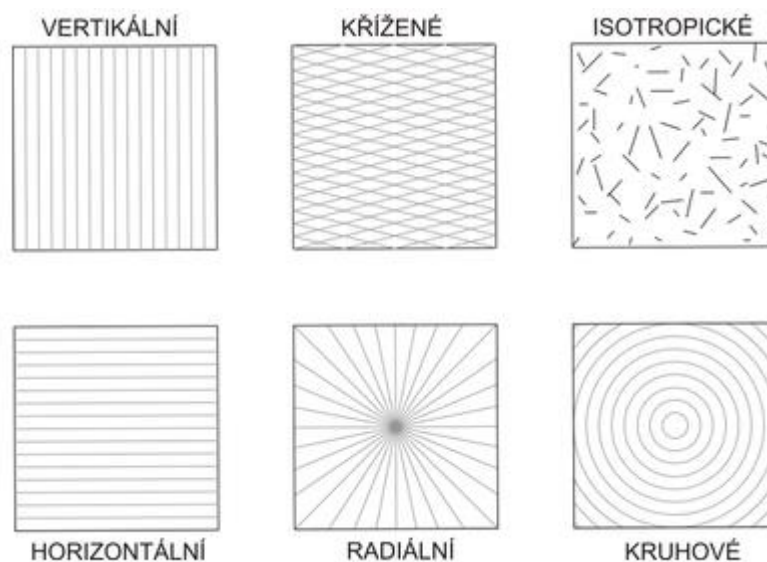
4 Definice profilu povrchu a jeho parametrů

Před experimentální částí je potřeba si přiblížit a definovat základní pojmy, které budou využívány pro bezchybné vyhodnocení. Důležitým pojmem je integrita povrchu, ta označuje všechny vlastnosti měřeného povrchu.

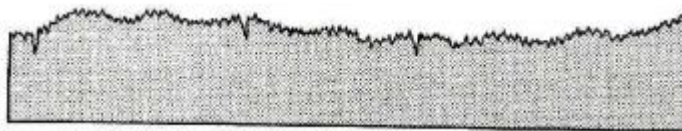
4.1 Základní pojmy popisující povrch

4.1.1 Struktura povrchu

Označuje geometrické odchylky daného povrchu od ideálního tvaru. Velikost odchylky je dána způsobem výroby, opracováním povrchu i neúmyslnou rýhou. Vzhled povrchu může být různý a závisí na technologii obrábění. Jeho základní pohledy jsou vidět níže na obrázku 6. [16]



Obr. 6: Vzhled povrchu [16]



Obr. 7: Skutečný profil povrchu [17]

Obecný tvar vznikne po odfiltrování drsnosti a vlnitosti, protože tyto dvě úchytky způsobuje nedostatečná tuhost a tepelné ovlivnění. Tepelné ovlivnění vzniká při výrobě a způsobuje deformaci povrchu. [17]

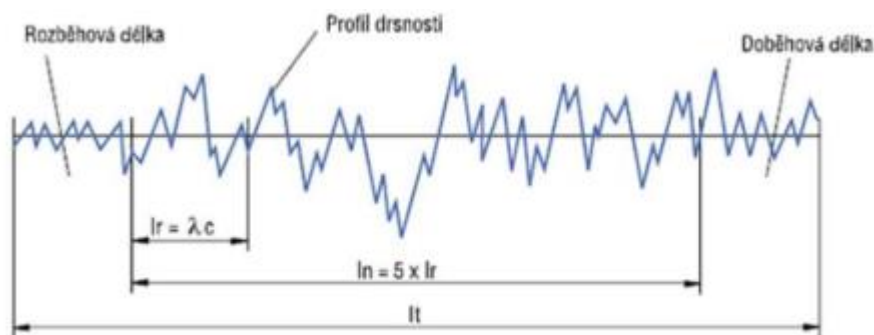


Obr. 8: Obecný tvar povrchu [17]

4.1.2 Základní a vyhodnocovaná délka

Základní délka l_r je délka ve směru osy X. Používá se pro rozpoznání a vyhodnocení nerovností měřeného profilu. Hodnoty základní délky jsou rovny vlnové délce λ_c . [11]

Vyhodnocovaná délka l_n je délka ve směru osy X. Používá se pro vyhodnocení měřeného profilu. Vyhodnocovaná délka l_n může zahrnovat jednu nebo i více základních délek. [11]



Obr. 9: Schéma délek vyhodnocovaného profilu [21]

4.1.3 Volba mezní vlnové délky

Mezní vlnová délka je důležitý parametr měřicího přístroje a je funkcí profiloměru. Před každým měřením je důležité vybrat správnou mezní vlnovou délku. Nejčastěji se volí podle následující tabulky. Na začátku každého měření je zapotřebí usoudit, jestli je měřený profil aperiodický, či nikoli. Dále následuje kontrolní měření, ve kterém se zjistí rozsah R_z a R_a . Podle tabulky se pak vybere odpovídající mezní vlnová délka a měření se následně zopakuje s již správně nastavenou vlnovou délkou.

Tab. 1: Volba mezní vlnové délky periodických a aperiodických profilů [8]

Periodické profily	Aperiodické profily		Mezní vlnová délka (Cutoff)	Jednotlivá / celková měřicí dráha
R_{sm} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	L_r/L_n (mm)
> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08	0,08 / 0,4
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25	0,25 / 1,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8	0,8 / 4
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5	2,5 / 12,5
> 1,3 do 4	> 50 do 200	> 10 do 80	8	8 / 40

4.1.4 Filtrování profilu

Pro vyhodnocení různých parametrů je důležité naměřený povrch profilu filtrovat. K tomu se používají filtry s různou vlnovou délkou. Profily se rozdělují díky filtrům na krátkovlnné a dlouhovlnné složky: základní profil P, vlnitost W a drsnost R. [4]

λ_s filtr profilu určuje rozhraní mezi kratšími vlnovými složkami profilu a profilem drsnosti. [4]

λ_c filtr profilu je mezní vlnová délka mezi profilem drsnosti a vlnitostí. [4] [5]

λ_f filtr profilu udává vztah mezi vlnitostí a delšími složkami vln. [4]

4.1.5 P profil – základní profil

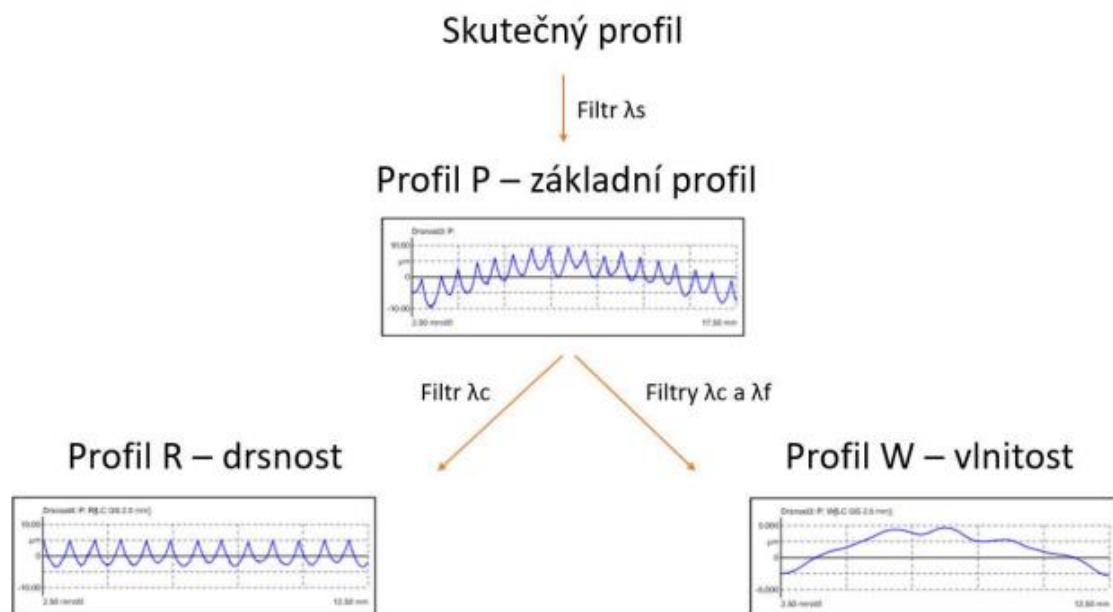
Základní profil vzniká po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Ukazuje všechny odchylky od střední čáry a je důležitý pro vyhodnocení parametrů základního profilu. [4]

4.1.6 W profil – vlnitost povrchu

Profil vlnitosti vzniká po aplikaci filtrů λ_f a λ_c ze základního profilu. Pomocí filtru λ_f se v profilu neobjevují dlouhovlnné podíly. Jedná se o další stupeň nepravidelností, které se zjišťují na krátkých vyhodnocovacích úsecích. [2] [4]

4.1.7 R profil – drsnost povrchu

Profil drsnosti je odvozený ze základního profilu. Použitím filtru λ_c dochází k potlačení dlouhovlnných složek. Profil je základem pro vyhodnocení parametrů drsnosti. Drsnost je nejmenší nerovnost na povrchu profilu, která je způsobena působením řezného nástroje a ukazuje pozůstatek rýh nebo stop po výrobní technologii. [2] [4]



Obr. 10: Postup filtrace profilu povrchu [21]

4.2 Parametry profilu povrchu

4.2.1 Rozdělení základních parametrů profilu

Tab. 2: Rozdělení základních parametrů profilu [4]

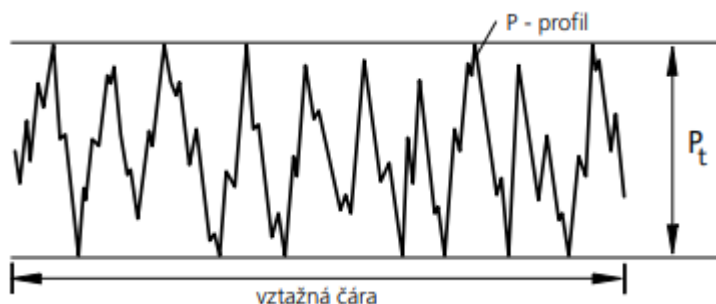
Parametry struktury povrchu			Označení
Výškové	Prohlubně a výstupky	Celková výška profilu	P_t, R_t, W_t
		Největší výška profilu	P_z, R_z, W_z
		Největší výška výstupku	P_p, R_p, W_p
		Největší výška prohlubně	P_v, R_v, W_v
		Maximální výška profilu	$P_{max}, R_{max}, W_{max}$
	Průměrné hodnoty	Průměrná aritmetická úchylka profilu	P_a, R_a, W_a
		Průměrná kvadratická úchylka profilu	P_q, R_q, W_q
		Průměrná výška profilu	P_c, R_c, W_c
		Šikmost profilu	P_{sk}, R_{sk}, W_{sk}
		Špičatost profilu	P_{ku}, R_{ku}, W_{ku}
Délkové	Průměrná šířka prvku profilu	P_{sm}, R_{sm}, W_{sm}	
Hybridní	Průměrný kvadratický sklon profilu	P_{dq}, R_{dq}, W_{dq}	
Křivkové	Materiálový poměr profilu	$P_{mr}(c), R_{mr}(c), W_{mr}(c)$	
	Vzájemný materiálový poměr	P_{mr}, R_{mr}, W_{mr}	
	Rozdíl výšky úseku profilu	P_{dc}, R_{dc}, W_{dc}	

4.2.2 Nejpoužívanější výškové parametry

Hloubka profilu (P_t) neboli celková výška profilu P je dána sečtením maximální výšky špičky profilu a největší hloubky prohlubně P profilu uvnitř změřené dráhy. Délka konkrétní použité dráhy měření se musí uvést. [8]

Primární profil P vzniká z profilu, který byl získán dotykovou metodou:

- Jmenovitý tvar je odstraněn metodou nejmenšího součtu čtverců odchylek pomocí regresní přímky. [8]
- Oddělením velmi krátkých vlnových délek, které se následně nepočítají do vyhodnocení. Všem pomáhá profilový filtr λ_s , protože zlepšení srovnatelnosti je zaručeno krátkovlnnou mezní vlnovou délkou λ_s . [8]

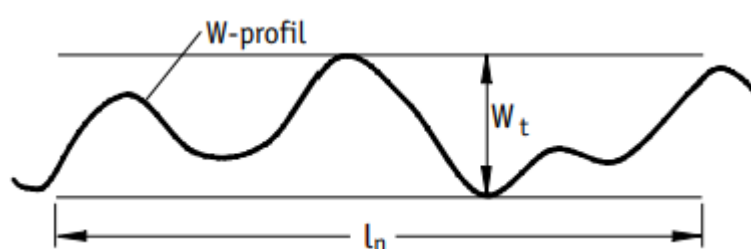


Obr. 11: Hloubka profilu [8]

Hloubka vlny (W_t) neboli celková výška W-profilu je dána sečtením nejvyšší špičky profilu a největší hloubky prohlubně W-profilu uvnitř změřené dráhy l_n . [8]

Délku měřicí dráhy l_n je důležité určit. [8]

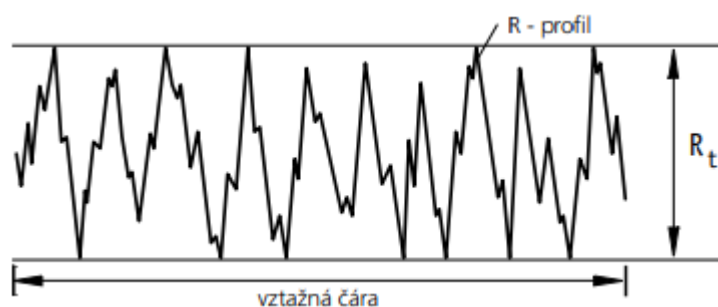
Profil vlnitosti (W-profil) je střední čára, která je vytvořena filtrem λ_c z P-profilu. Dlouhovlnné podíly přiřazené nějakému tvaru v něm nejsou obsaženy. Označení W_t' je vyrovnaný profil vlny na střední čáře. [8]



Obr. 12: Hloubka vlny [8]

Hloubka drsnosti (R_t) neboli celková výška R-profilu je dána sečtením nejvyšší špičky profilu a největší hloubky R-profilu uvnitř změřené dráhy. [8]

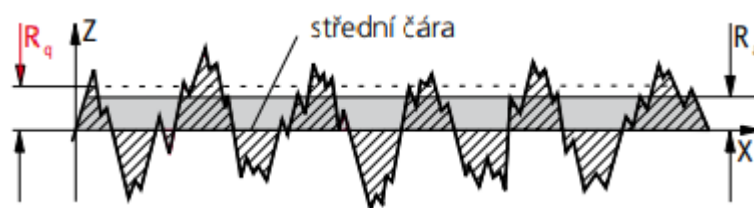
Délku vztažné dráhy je důležité uvést [8]



Obr. 13: Hloubka drsnosti [8]

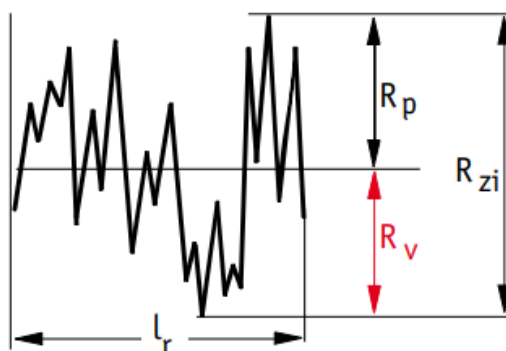
Průměrná kvadratická hodnota drsnosti (R_q) je kvadratickou střední hodnotou všech hodnot profilu drsnosti. Pro R_a se může používat označení AA a CLA a pro R_q označení RMS, nejčastěji se používá R_a a R_q . [8]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx}$$



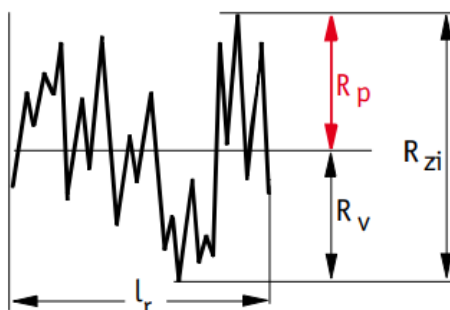
Obr. 14: Průměrná kvadratická hodnota drsnosti [8]

Hloubka největší prohlubně (R_v) je největší hloubka R - profilu uvnitř jednotlivé měřicí dráhy. Pro parametr R_v může být použita zkratka R_m . Součet $R_p + R_v$ je dílčí hloubka drsnosti R_{zi}' [8]



Obr. 15: Hloubka největší prohlubně [8]

Výška největší špičky (R_p) je výška největší špičky měřeného profilu drsnosti uvnitř konkrétní měřicí dráhy. Podle starších definicí je možné použít pro střední hodnotu označení R_{pm} . Součet $R_p + R_v$ je konkrétní hloubka drsnosti R_{zi} . [8]



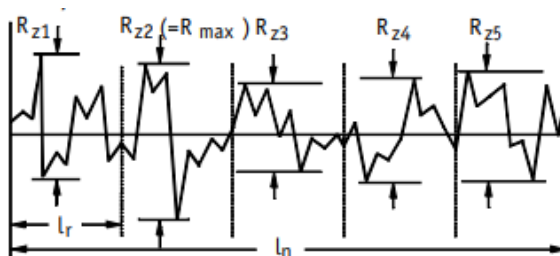
Obr. 16: Výška největší špičky [8]

Hloubka drsnosti (R_z , R_{max}) je dána součtem výšky největší špičky profilu a největší hloubky profilu drsnosti uvnitř konkrétní měřicí dráhy. [8]

Hloubka drsnosti R_z je střední aritmetická hodnota z jednotlivých hloubek drsnosti R_{zi} . [8]

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn})$$

Aktuální definice R_z odpovídá normě DIN 4768:1990. Ve starší definice (ISO 4287:1984) byla obsahující výška z deseti bodů vyškrtnutá společně s krátkou značkou R_y . Maximální hloubka drsnosti R_{max} je největší konkrétní hloubka drsnosti uvnitř celkové dráhy, podél které bylo měřeno. [8]



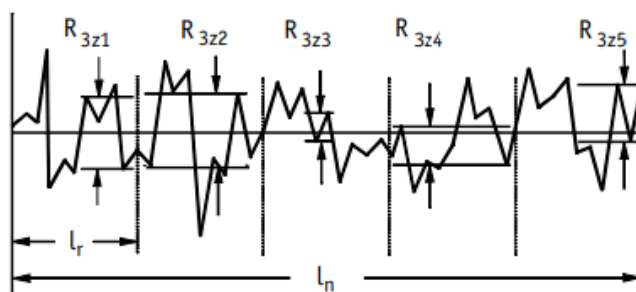
Obr. 17: Hloubka drsnosti [8]

Základní hloubka drsnosti (R3z) je střední hodnota z konkrétních hloubek drsnosti R3zi z pěti za sebou následujících jednotlivých měřicích drah l_r . [8]

$$R_{3z} = \frac{1}{5} (R_{3z1} + R_{3z2} + \dots + R_{3z5})$$

Prohlubeň i špička profilu musí překročit svislou i vodorovnou minimální velikost. [8]

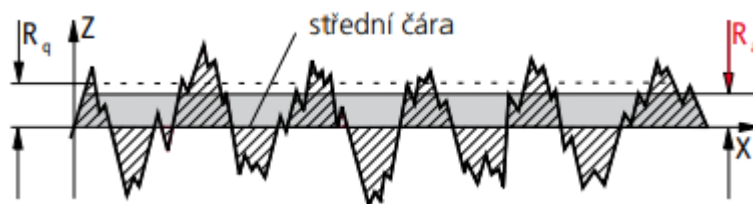
R3zi je kolmá vzdálenost v pořadí třetí vysoké špičky profilu od třetí prohlubně profilu drsnosti uvnitř jedné konkrétní měřicí dráhy. [8]



Obr 18: Základní hloubka drsnosti [8]

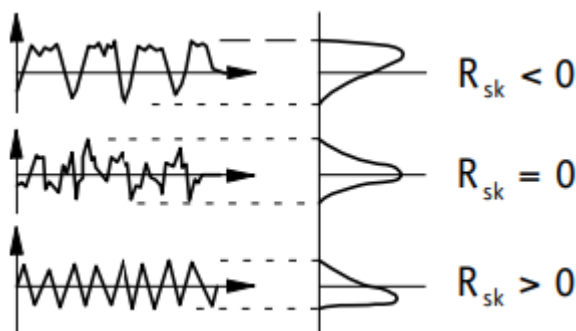
Průměrná aritmetická hodnota drsnosti (Ra) je aritmetickou střední hodnotou všech hodnot profilu drsnosti. Z toho důvodu je tento parametr označován za méně přesný. Pro Ra se může používat označení AA a CLA a pro Rq označení RMS, nejčastěji se používá Ra a Rq. [8]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$



Obr. 19: Průměrná aritmetická hodnota drsnosti [8]

Sklon posuzovaného profilu drsnosti (R_{sk}) je hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky. Záporný sklon označuje povrch s výbornou nosností. Parametr sklonu bude hodně ovlivněn špičkami a rýhami. Díky tomu bude jeho praktický význam snižován. [8]

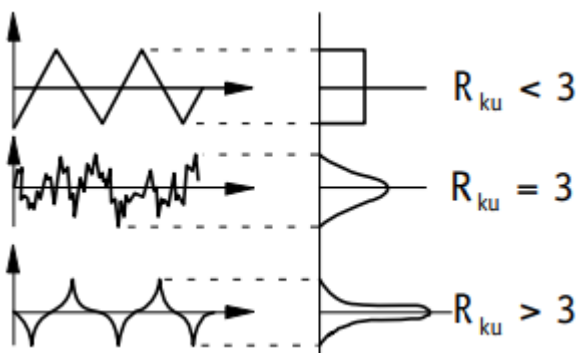


Obr. 20: Sklon posuzovaného profilu drsnosti [8]

Strmost profilu drsnosti (R_{ku}) je strmost hustoty amplitudové křivky. Při klasickém rozdělení hodnot profilu je $R_{ku} = 3$. [8]

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx$$

Parametr strmost profilu drsnosti bude ovlivněn špičkami a rýhami. [8]

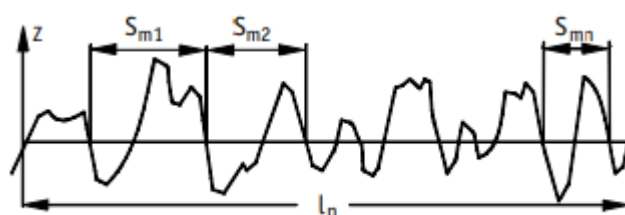


Obr. 21: Strmost profilu drsnosti [8]

Střední stoupání profilu ($R_{\Delta q}$) je kvadratická střední hodnota lokálních stoupání profilu drsnosti. [8]

$$R_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx}$$

Pomocí hladící funkce se spočítá lokální stoupání profilu tak, aby byl vliv šumu redukován. [8]



Obr. 22: Střední stoupání profilu [8]

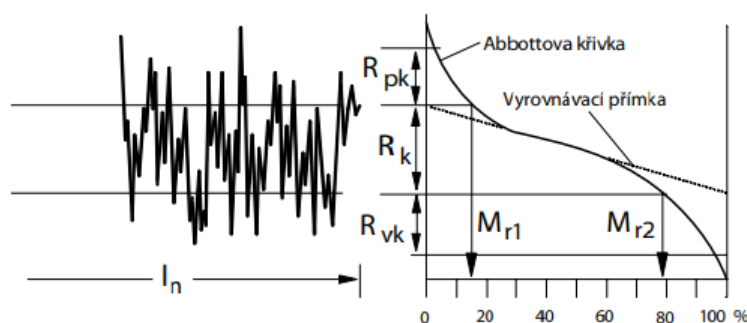
Veličiny nosného podílu (R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2}) jsou způsob filtrace s potlačením rýh. Na Abbottově křivce speciální vyrovnávací přímka rozděluje tento podíl na tři rozsahy, díky nimž se zjistí určité parametry. [8]

R_k – hloubka jádrového profilu drsnosti. [8]

R_{pk} – střední výška špiček, které vyčnívají z rozsahu jádra. [8]

R_{vk} – střední hloubka rýh, které vyčnívají z jádrového rozsahu. [8]

M_{r1} a M_{r2} označují nejmenší a největší materiálový podíl jádrového profilu drsnosti. [8]

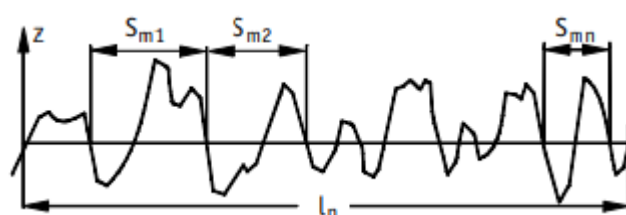


Obr. 23: Veličiny nosného podílu [8]

4.2.3 Nejpoužívanější délkové parametry

Střední vzdálenost rýh (Rsm) je střední aritmetická hodnota šířek elementů profilu drsnosti. Vyvýšení profilu se sousedním prohloubením je jeden profilový element. Starší zdroje označují parametr Rsm jako Ar. [8]

$$R_{SM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$$



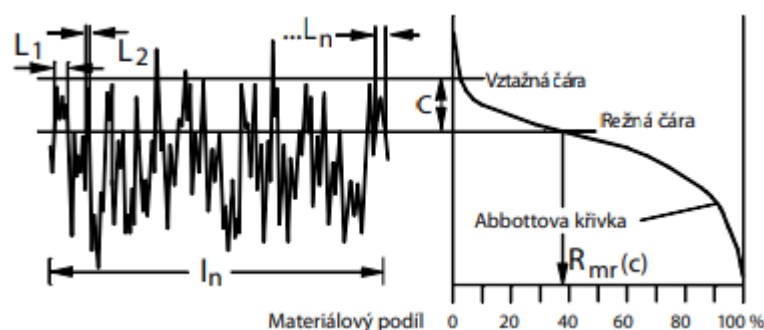
Obr. 24: Střední vzdálenost rýh [8]

4.2.4 Nejpoužívanější křivkové parametry

Materiálový podíl profilu drsnosti (R_{mr}) je poměr materiálu zaplněné délky uvedený v procentech, který je měřený k dráze l_n v řezu c. [8]

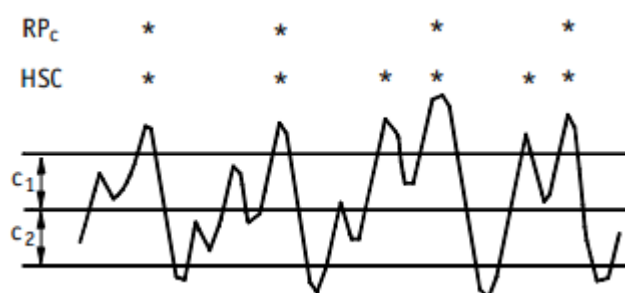
$$R_{mr} = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) 100\%$$

Hladina řezu c je odstup vyhodnocené řezné čáry ke zvolené vztažné čáře. Abbottova křivka udává podíl materiálu v závislosti na hladině řezu c. [8]



Obr. 25: Materiálový podíl drsnosti [8]

Počet špiček (RP_c) je množství profilových elementů na centimetr, které překračují horní hladinu řezu C1 a poté pokračují na dolní hladinu řezu C2. Vedle počtu špiček RP_c je občas používán parametr HSC (počet špiček profilu na centimetr, které překračují nastavenou hladinu řezu C1). [8]



Obr. 26: Počet špiček [8]

4.3 Vyhodnocení měření drsnosti

Charakteristiky drsnosti se pohybují v rozpětí od -20 % do +30 %. Hlavně se jedná o vertikální parametry R_z , R_t , R_a a R_{zmax} . Nikdy nestačí, pokud se naměří pouze jedna hodnota, protože tato hodnota nevykazuje žádné komplexní hodnocení, tudíž ani nemůže odpovídat tolerančním hodnotám. [9]

4.3.1 Pravidlo maxima

Pravidlo maxima se použije, pokud je požadavek, aby hodnoty parametrů na kontrolovaném povrchu nepřesáhly ani jednou předepsanou horní mez. [9]

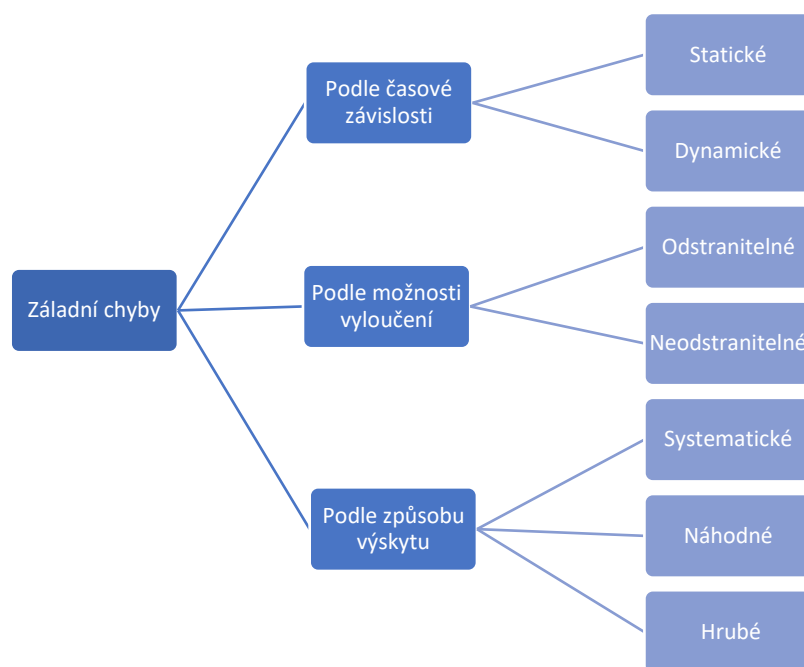
4.3.2 Pravidlo 16%

Měřený povrch profilu je dostatečný, jestliže počet naměřených hodnot nepřesahuje 16 % na vyhodnocované délce předepsanou hodnotu horní meze. Pravidlo 16 % se nepředepisuje, protože je standardní. [9]

4.4 Chyby měření a jejich příčiny

Jakékoliv měření je pokaždé ovlivněno nějakou chybou, ať už úmyslně nebo neúmyslně. Mezi hlavní příčiny, za kterých vznikají chyby jsou: [14], [15]

- Nepřesné měřicí zařízení (zařízení neodpovídá požadovaným specifikacím)
- Nepřesný měřicí systém (neodborná kalibrace celého systému)
- Špatně vybraná měřicí metoda
- Nevyhovující podmínky při měření (projeví se na opakovatelnosti měření)
- Nedostatečně proškolená osoba (absolutní neodborník)



Obr. 27: Základní rozdělení chyb [14] [15]

Skutečné chyby:

Skutečné chyby měření jsou výše uvedené chyby dohromady. Pro odstranění nebo minimalizaci těchto chyb je důležité co nejvíce omezit systematické a hrubé chyby. Zbývající rozdělení chyb lze považovat za náhodné chyby. [14], [15]

4.5 Přehled norem ČSN

V následujících kapitolách jsou popsány čtyři základní normy GPS – Geometrické požadavky na výrobky. Popisují a definují jednotlivé parametry a předepsané metody měření drsnosti.

4.5.1 GPS – Termíny, definice a parametry skruktury povrchu ČSN EN ISO 4287 – 1999

Norma ČSN EN ISO 4287 popisuje termíny, definice a parametry v oblasti rozboru povrchu. Hlavními veličinami jsou drsnost, vlnitost a primární profil, které se získají pomocí profilové metody. Vždy se musí vycházet ze znalostí o filtru λ_f a λ_c . Filtr profilu λ_f definuje přechod mezi vlnitostí a delšími složkami vln, které se objevují na povrchu. Filtr profilu λ_c definuje přechod mezi vlnitostí a drsností. Parametry profilu drsnosti určují charakteristiku povrchu. Podle aktuální normy ČSN EN ISO 4287 jsou definovány pouze 2D charakteristiky, ale existují přístroje, které jsou schopné vyhodnotit i 3D charakteristiky. Předcházející norma ČSN ISO 468 a ČSN 01 4451 byla nahrazena právě touto normou ČSN EN ISO 4287, která byla schválena 26. ledna 1998. Později byla doplněna o výsledný počet výstupků a schválena 27. května 2009. [4]

4.5.2 GPS - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu ČSN EN ISO 4288 – 1997

Norma ČSN EN ISO 4288 stanovuje pravidla, která jsou uplatňována při porovnávání hodnot s tolerančními rozsahy definovanými pro parametry profilu. Dále tato norma stanovuje standardní pravidla pro výběr mezních vlnových délek cut-off λ_c pro parametry drsnosti povrchu. Tyto parametry jsou měřeny dotykovými přístroji ISO 3274. Předchůdcem normy ČSN 4288 byla norma z roku 1985. Rozdíl těchto dvou norem je ve výběru mezní vlnové délky cut-off, protože v současné normě se hodnoty vybírají podle struktury povrchu profilu. Dříve se hodnoty vybíraly podle údajů na výkrese. Norma ČSN EN ISO 4287 byla schválena 2. listopadu 1997. [5]

4.5.3 GPS – Jmenovité charakteristiky dotykových přístrojů ČSN EN ISO 3274 – 1997

Norma ČSN EN ISO 3274 je normou geometrických požadavků na výrobky. Definuje profily a strukturu hrotových měřících přístrojů pro měření vlnitosti a drsnosti povrchu. Dále z této mezinárodní normy vyplívají vlastnosti přístrojů, které mohou ovlivnit naměřené hodnoty. Norma ČSN EN ISO 3274 byla schválena 2. listopadu 1997. [6]

4.5.4 GPS – Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti ČSN EN ISO 13565 – 1999

V části 1 (ČSN EN ISO 13565-1) se norma zabývá metodou filtrace, používanou pro povrch s hlubokými prohlubněmi s nízkým obsahem vlnitosti. Výsledkem filtrace je referenční čára, která je nevhodně ovlivněna prohlubněmi. Tento nežádoucí vliv je řešen tak, že je vygenerována jiná referenční čára, která je vyhovující. Norma byla schválena 2. listopadu 1997. [7]

V části 2 (ČSN EN ISO 13565-2) se stanovuje proces hodnocení z Abbottovy křivky, která má za úkol popis materiálového podílu. Ten roste se stoupající hloubkou profilu drsnosti. K posouzení chování povrchu se používají parametry z této normy. Norma byla schválena 2. listopadu 1997. [7]

V části 3 (ČSN EN ISO 13565-3) se vychází z Gaussovy křivky materiálového poměru. Posuzuje se tribologické chování. Norma byla schválena 2. dubna 2000. [7]

5 Titan

Titan byl objeven nezávisle na sobě W. Gregorem a M. K. Klaprothem. Ze začátku se vlastností titanu využívalo pouze ve vojenské technice, ale od roku 1957 se začal titan používat i v ostatních průmyslech. [13]

Minerálů, které se vyskytují ve volné přírodě a obsahují titan je mnoho. Důležitým prvkem pro výrobu titanu jsou rutil, který obsahuje až 90 % TiO_2 a ilmenit se 40 % - 60 % TiO_2 . Příprava a výroba čistého titanu je kvůli jeho vysoké slučivosti s dusíkem, kyslíkem a ostatními prvky obtížná. Z toho důvodu se nejdříve musí vyrobit chlorid titaničitý v elektrické peci. Provádí se to chlorací kalcinovaných briquet z práškového uhlíku a směsi rutilu. Následně se chlorid titaničitý ve zvláštní peci redukuje hořčíkem na titanovou houbu, která se dále zpracovává. V dnešní době mezi nadějně metody výroby titanu patří elektrolýza bezkyslíkatých solí. [13]

5.1 Vlastnosti titanu

Větší část fyzikálních vlastností se určilo až když se vyrobil čistý titan. Mezi jeho nejvýznamnější vlastnosti patří: [13]

Vysoký bod tání – 1665 °C

Velký měrný elektrický odpor – $45 \times 10^{-6} \mu\Omega \text{ cm}$

Velké měrné teplo – 0,13 cal/g °C

Malá tepelná vodivost – 0,045 cal/cm

Malá měrná váha – 4,5g/cm³

Malá tepelná roztažnost – $8,15 \times 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$

Mechanické vlastnosti titanu zásadně ovlivňují nečistoty jako je například kyslík, uhlík a dusík. Čistý titan se většinou pevnostně podobá konstrukčním ocelím, ale jeho modul pružnosti je nižší (11 000 kg/mm²). Jeho zásadní vlastností je vysoký poměr meze pevnosti a meze kluzu. To má vliv na tváření za studena. [13]

Při vyšších teplotách titan ztrácí pevnost. Z toho vyplývá, že jeho stálé vlastnosti lze použít přibližně do 300 °C. Při nízkých teplotách se pevnost a mez kluzu zvyšuje. Naopak se zmenšuje tažnost, vrubová houževnatost i kontrakce. [13]

Z dalších technologických vlastností je součinitel tření nepříznivě vysoký. Součinitele tření běžná maziva nesníží, ale povrchové úpravy titanu ano. [13]

Velká výhoda titanu je odolnost proti korozi a v přírodě i v průmyslovém ovzduší je titan prakticky neměnný. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou odolnost proti vlhkému chlóru a odolnost vůči erozi a kavitaci. [13]

5.2 Použití titanu v letectví

V leteckém průmyslu byly požadovány vyšší a vyšší požadavky na kvalitu materiálu z důvodu zvyšování rychlostí letadel. Je zcela jisté, že požadavkům nemůžou vyhovovat slitiny hliníku nebo hořčíku. Oceli mají zase příliš vysokou hmotnost, zatímco titan a jeho slitiny mají vynikající poměr meze pevnosti ku hmotnosti jak při nižších, tak i vyšších teplotách. Například při spotřebě 500 kg titanu na tryskové letadlo znamená váhovou úsporu pro 5 lidí i se zavazadly. [13]

Z toho všeho vyplývá, že největším spotřebitelem titanu jsou letadla s rychlostmi až 3,5 Machova čísla. Titan a jeho slitiny se používají na draky, přístroje a motory letadel. Například u motorů to jsou jednotlivé části kompresorů (rotory, disky, skříně kompresorů, prstence), rotační a stacionární lopatky, stírací armatury, ojnice, distanční kroužky, písty, matice, šrouby, převodové a turbínové skříně, pružiny a trubková vedení. Titanových zařízení a výrobků je spousta, ale je zřejmé, že nikdy nebude kompletně celé letadlo vyrobené z titanu. Lze však odhadnout, že titan bude i nadále hlavním materiálem pro konstrukci letadel, tudíž bez titanu se letecký průmysl neobejde. [13]

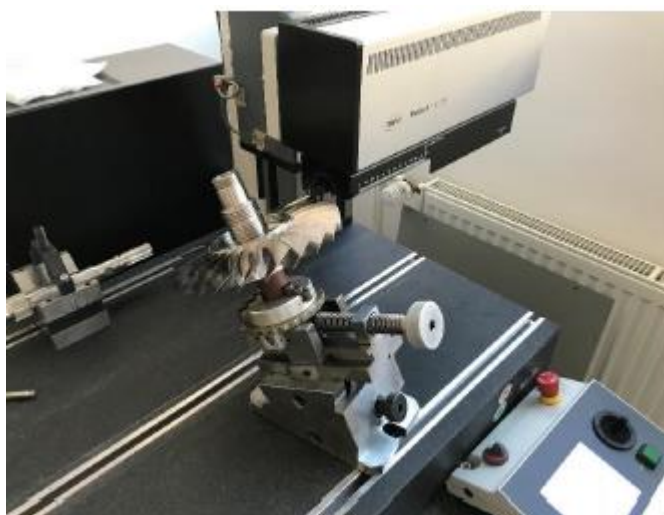
6 Experimentální měření

6.1 Leštění

Leštění bylo použito jako dokončovací technologie lopatek leteckého motoru. Je to mechanický úběr pomocí leštícího média, které je složeno z drobných měděných výstřižků o velikosti cca 3 x 3 mm a práškového korundu. Použitelnost měděného média je v nepřetržitém provozu přibližně 3 měsíce. Čím déle je médium používáno, tím menší je leštící účinek. Při procesu leštění dochází ke zlepšení parametrů drsnosti povrchu. Na druhou stranu ale dochází i k zaoblování ostrých hran, což je nežádoucí jev. Stroj, který se k tomuto používá se skládá ze zásobníků s abrazivem a leštící komory s magnetem. Celý proces je poháněn oscilačním motorem, který v nastavené frekvenci kmitů třese s pracovní nádobou a tím dochází k pohybu média uvnitř pracovního prostoru. Po dokončení operace je leštící médium propláchnuto vodou a přemístěno zpět do zásobníku. Leštění je relativně špinavý proces, protože po neodstranění zbytků chemických látek zůstávají na povrchu fleky, které ovšem neovlivňují vlastnosti povrchu.

6.2 Měřicí přístroj

Mahr LD 120 je velice přesný přístroj a slouží pro měření drsnosti a kontury povrchu. Lze na něm odečítat naměřené hodnoty všech posuvových os. Obsluze to ulehčuje a zrychluje práci, kdy stroj nastaví do stejné polohy při výměně součásti a zároveň se zvyšuje opakovatelnost měření. Zbytkové hodnoty $R_z = 35 \text{ nm}$ a dynamické řízení měřicí síly v rozmezí $0,5 \text{ mN} - 30 \text{ mN}$ zaručuje nejvyšší možnou přesnost. Stroj je řízen softwarem MarWin, který umožňuje získat celkem přehledné grafické vyhodnocení. Pro měření byl využit snímač s krátkým hrotem, vrcholovým úhlem 60° a poloměrem špičky $2 \text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 28: Přístroj Mahr LD 120

6.2.1 Geometrie snímacího doteku

Pro změření povrchu lopatek byl použit snímací hrot MarSurf LDB 4–10–2. Tento snímač byl vybrán z důvodu svých rozměrů. Díky své délce 100 mm a rozsahu 10 mm byl snímač schopný měřit mezi lopatkové prostory. V tabulce 3 jsou vidět další technické parametry snímacího hrotu.

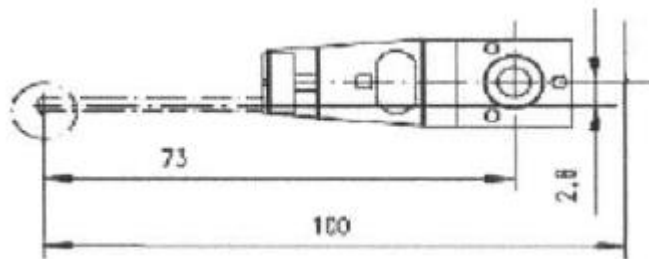
Technické parametry:

Tab. 3: Technické parametry snímacího hrotu MarSurf LDB 4-10-2 [20]

Měřicí rozsah	10 mm
Délka	100 mm
Poloměr měřicího hrotu	0,002 mm
Otevřený úhel špičky	60°
Celková výška měřicího hrotu	4 mm
Rozsah	-35°
Drsnost Rz	> 0,5 μm
Drsnost Ra	> 0,8 μm



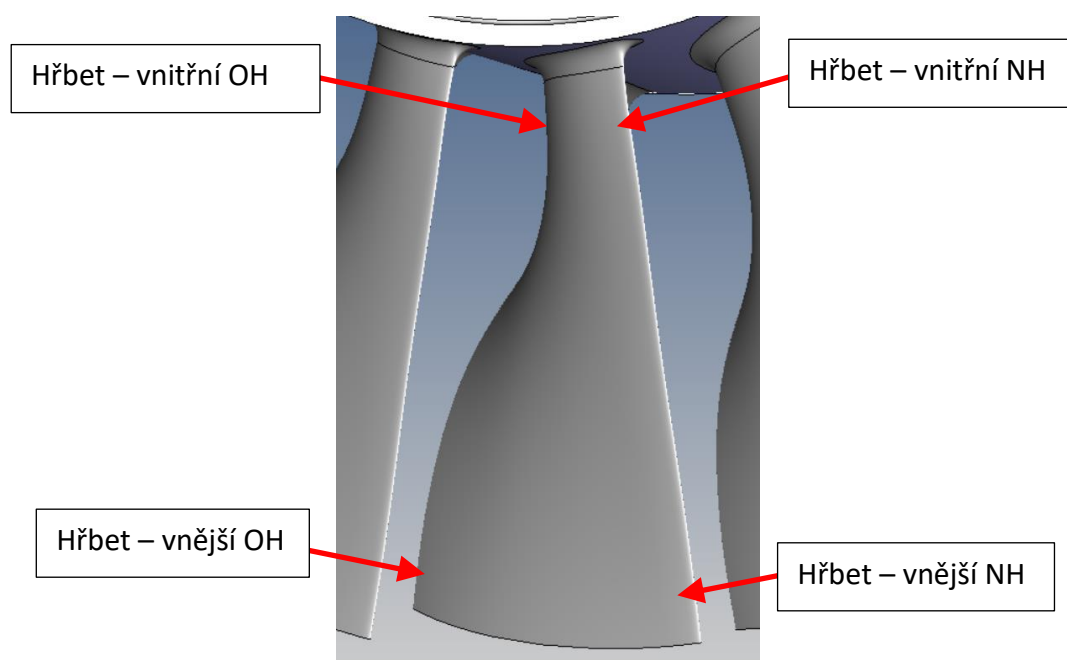
Obr. 29: Snímací hrot MarSurf LDB 4-10-2



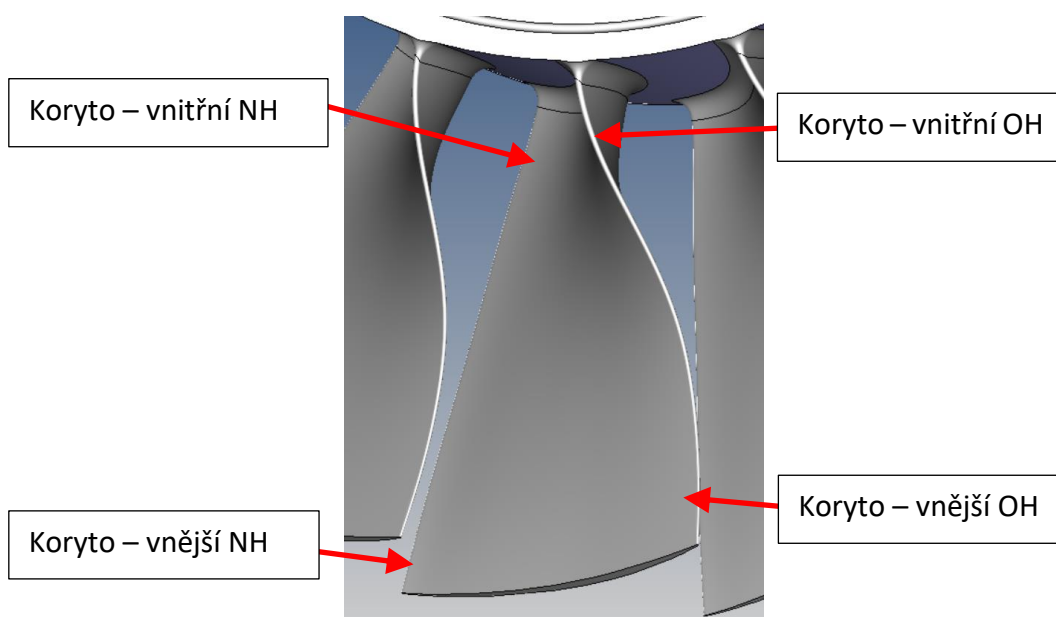
Obr. 30: Základní výkres snímacího hrotu [20]

6.3 Popis měřených lopatkových kol

Na obrázcích 31 a 32 je vyobrazený hřbet a koryto lopatek. U každé označené části jsou použity zkratky z důvodu dlouhého názvosloví. Zkratkou OH je označena odtoková hrana a zkratkou NH je označena náběžná hrana.



Obr. 31: Hřbet lopatky



Obr. 32: Koryto lopatky

6.3.1 Měření drsnosti na vybraných površích lopatek

Povrch leštěných titanových lopatek byl změřen na několika místech, aby bylo možné porovnat vstupní a výstupní hodnoty do detailů. Na každém kole byla měřena každá třetí lopatka (č. 1, č. 4, č. 7, č. 10, č. 13...). Na obrázcích 31 a 32 jsou popsány jednotlivé části lopatek. Lopatka se skládá ze hřbetu a koryta. Hřbet je dále rozdělen na vnitřní/vnější náběžnou a vnitřní/vnější odtokovou hranu. To samé platí i u koryta.

6.4 Volba vhodných parametrů profilu povrchu

Jako první byl vybrán parametr R_a , jelikož výrobce tento parametr využívá k hodnocení povrchu. Ve skutečnosti je ale tento parametr velice nepřesný pro vyhodnocení povrchu, protože je to střední aritmetická hodnota profilu drsnosti. Z toho důvodu mohou být výsledné hodnoty zkresleny a vypovídací schopnost o stavu leštěného povrchu může být zavádějící.

Druhý uvažovaný parametr pro hodnocení povrchu po procesu leštění byl vybrán materiálový podíl RMr . Tento parametr hodnotí poměr mezi oddílem materiálu a vzduchové mezery v jednotlivých hloubkových řezech.

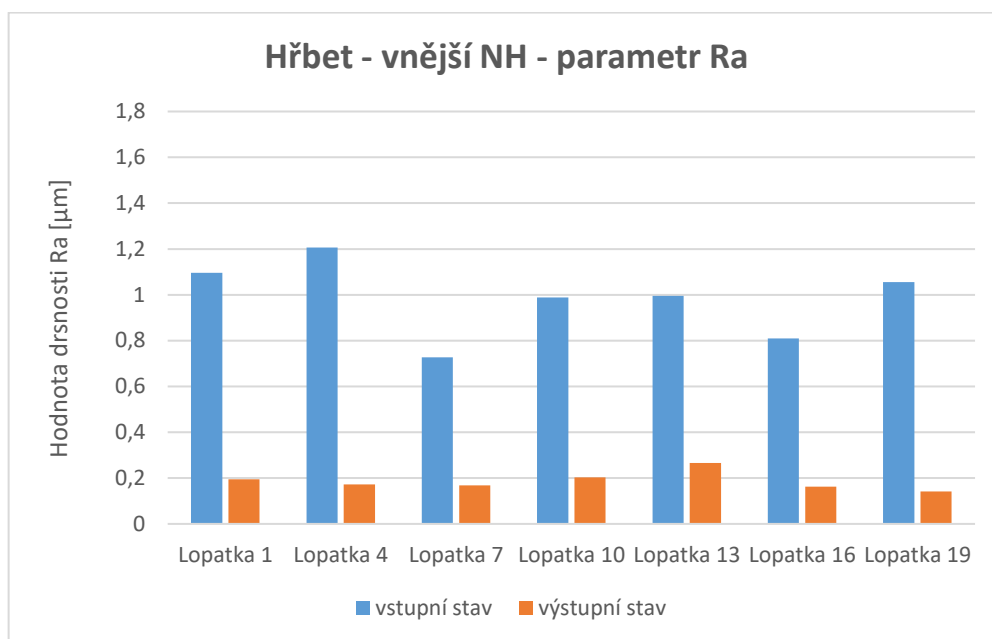
6.5 Vyhodnocení dílu 370 – kolo 1. stupně

U dílu 370 byla při leštění použita pozice nejdříve náběžnou hranou dolů a v druhém cyklu náběžnou hranou nahoru. Lopatky 1 až 11 byly leštěny náběžnou hranou dolů, s tím že lopatky 12 až 20 byly zakryty. Následovalo otočení lopatkového kola o 180° (náběžnou hranou nahoru), kde se lopatky 1 až 11 zakryly a byly odkryty lopatky 12 až 20. Celý cyklus trval 4 hodiny. V následující tabulce 4 jsou vstupní a výstupní naměřené hodnoty R_a . U hřbetu vnější NH se vstupní hodnoty pohybovaly kolem 1 μm . Výstupní hodnoty z tabulky 4 byly po leštění průměrně $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. To znamená, že došlo k razantnímu zlepšení kvality povrchu. V tabulce 4 jsou vidět i rozdílové hodnoty mezi vstupním a výstupním stavem. U koryta vnější NH byly vstupní hodnoty menší než 1 μm , takže rozdíly už nebyly tak vysoké jako u hřbetu. Z naměřených hodnot R_a z tabulky 4 vyplývá, že poloha náběžné hrany lopatkového kola při procesu leštění výsledný povrch neovlivňuje, protože rozdíly vstupních a výstupních hodnot se v tabulce 4 pro lopatky 1 až 11 a lopatky 12 až 20 lišili minimálně.

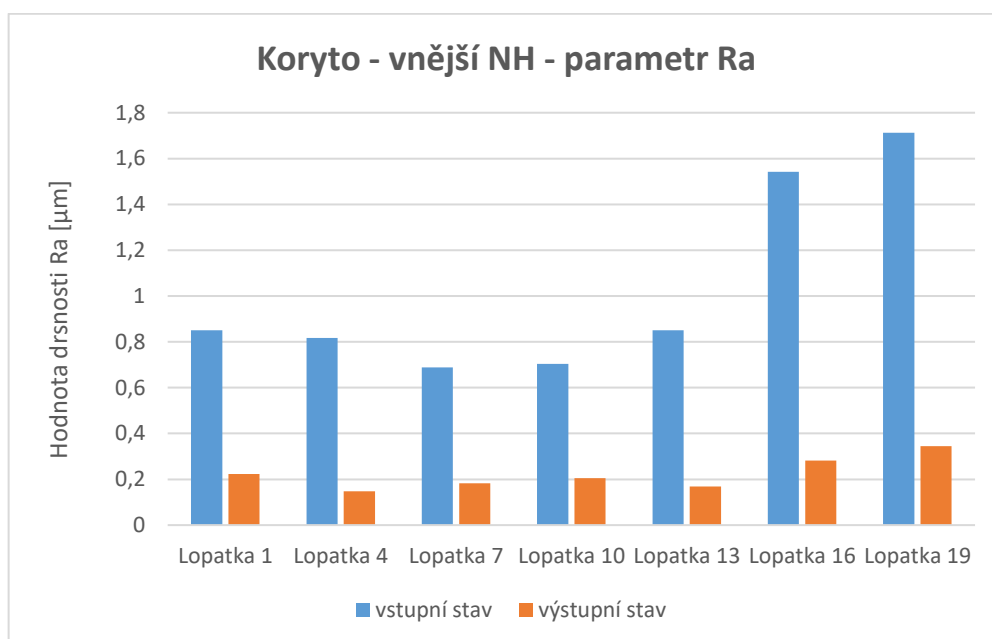
Tab. 4: Naměřené hodnoty R_a – Hřbet/Koryto vnější NH, díl 370

Parametr R_a [μm]	Hřbet – vnější NH			Koryto – vnější NH		
	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl
lopatka 1	1,096	0,194	0,902	0,851	0,223	0,628
lopatka 4	1,206	0,172	1,034	0,817	0,147	0,67
lopatka 7	0,727	0,168	0,559	0,688	0,182	0,506
lopatka 10	0,988	0,203	0,785	0,704	0,205	0,499
lopatka 13	0,995	0,266	0,729	0,851	0,169	0,682
lopatka 16	0,81	0,163	0,647	1,542	0,282	1,26
lopatka 19	1,056	0,142	0,914	1,713	0,344	1,369
minimum	0,727	0,142	0,559	0,688	0,147	0,499
maximum	1,206	0,266	1,034	1,713	0,344	1,369
průměr	0,983	0,187	0,796	1,024	0,222	0,802

Požadované hodnoty $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ byly dosaženy už při prvním cyklu, kdy byla náběžná hrana umístěna dolů. Na obrázku 33 a 34 lze vidět, že na určitých lopatkách se objevují menší výchylky, které nedosáhly požadovanou hodnotu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. To může být způsobeno např. rýhou na povrchu lopatky způsobenou předchozí technologickou úpravou.



Obr. 33: Naměřené hodnoty R_a – Hřbet vnější NH, díl 370



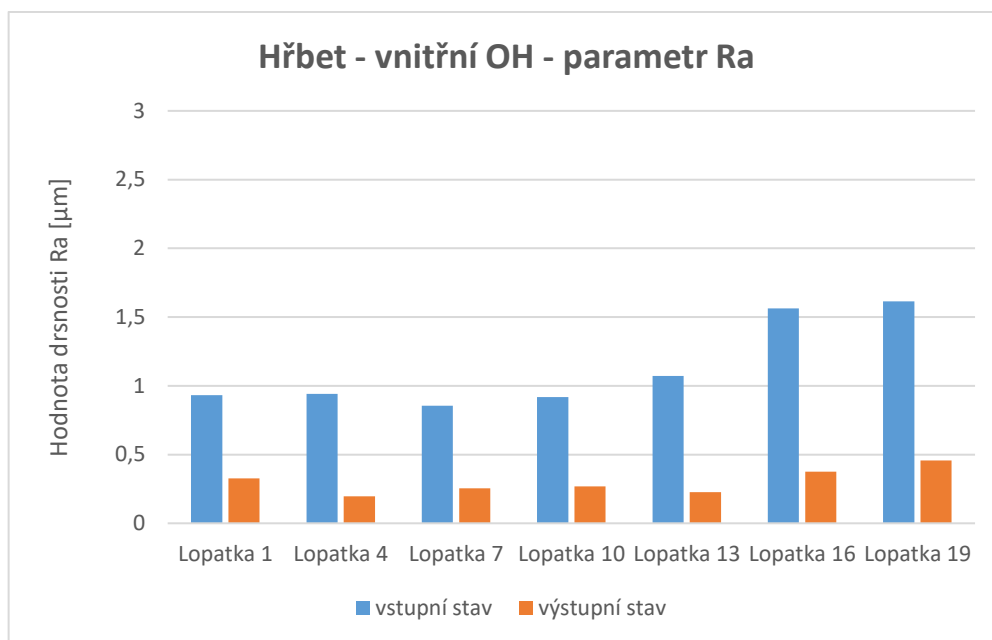
Obr. 34: Naměřené hodnoty R_a – Koryto vnější NH, díl 370

Při pozorování vnitřních OH hřbetu u koryta v tabulce 5 lze sledovat patřičné rozdíly na výsledných hodnotách po leštění. Je možno předpokládat, že to bylo způsobené působením leštícího média, které u vnitřní OH obtížně proudilo kolem povrchu jednotlivých lopatek. Jak lze vidět v tabulce 5, výsledný efekt leštění nedosáhl požadované průměrné hodnoty $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, tudíž nezanechal požadovaný výsledek. Z tabulky 5 dále vyplývá, že u hřbetu byl průměrný rozdíl vstupního a výstupního stavu přes $0,8 \mu\text{m}$, naopak u koryta byl tento rozdíl více než $1,8 \mu\text{m}$, což mohlo být způsobeno odlišným prouděním leštícího média kolem lopatek, které bylo způsobeno jiným tvarem povrchu lopatky u koryta.

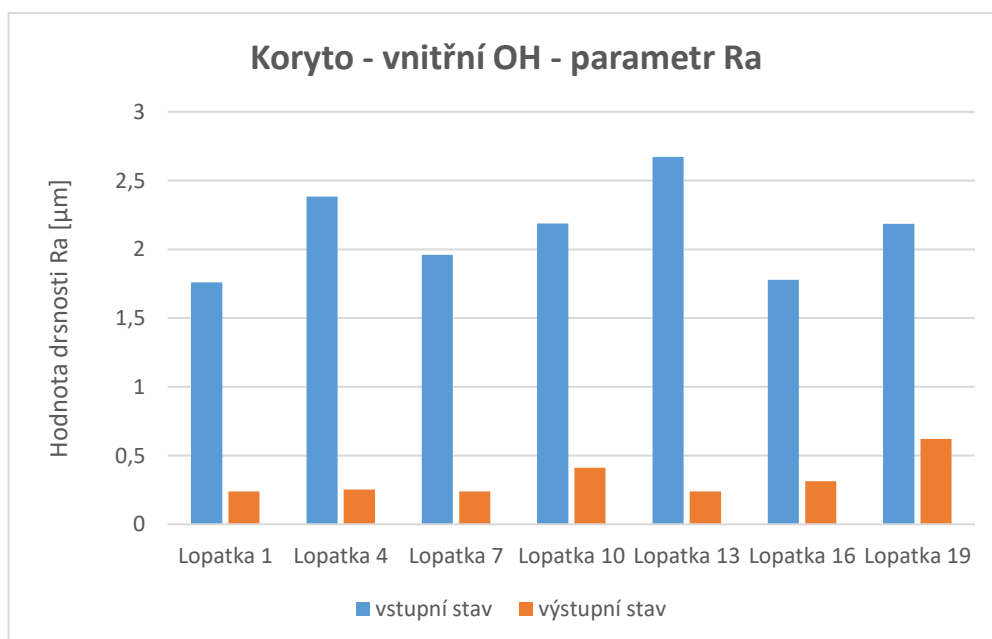
Tab. 5: Naměřené hodnoty R_a – Hřbet/Koryto vnitřní OH, díl 370

Parametr $R_a [\mu\text{m}]$	Hřbet – vnitřní OH			Koryto – vnitřní OH		
	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl
lopatka 1	0,932	0,326	0,606	1,76	0,24	1,52
lopatka 4	0,942	0,195	0,747	2,383	0,253	2,13
lopatka 7	0,856	0,254	0,602	1,961	0,238	1,723
lopatka 10	0,919	0,268	0,651	2,188	0,412	1,776
lopatka 13	1,071	0,226	0,845	2,673	0,238	2,435
lopatka 16	1,563	0,375	1,188	1,779	0,314	1,465
lopatka 19	1,614	0,457	1,157	2,185	0,621	1,564
minimum	0,856	0,195	0,602	1,76	0,238	1,465
maximum	1,614	0,457	1,188	2,673	0,621	2,435
průměr	1,128	0,300	0,828	2,133	0,331	1,802

V grafickém vyhodnocení na obrázku 35 můžeme pozorovat, že při leštění s náběžnou hranou umístěnou nahoru byly větší rozdíly na lopatkách 13 až 19. To ovšem platilo pouze u hřbetu. U koryta vnitřní OH na obrázku 36 se výsledné hodnoty při náběžné hraně nahoru a dolů lišily minimálně.



Obr. 35: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnitřní OH, díl 370



Obr. 36: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnitřní OH, díl 370

V další fázi byly naměřené lopatky vyhodnoceny pomocí materiálového podílu RMr. Naměřené výsledky jsou v tabulce 6 a 7. Vyhodnocení bylo provedeno pro RMr (-1,00;5,0), RMr (-2,00;5,0), RMr (-3,00;5,0). První číslo uvedené v závorce za RMr označuje hloubku povrchu v μm , ve které bylo měření provedeno. Z toho vyplývá, že se měřilo v hloubkách 1 μm , 2 μm a 3 μm . Druhé číslo vyjadřuje počet základních délek.

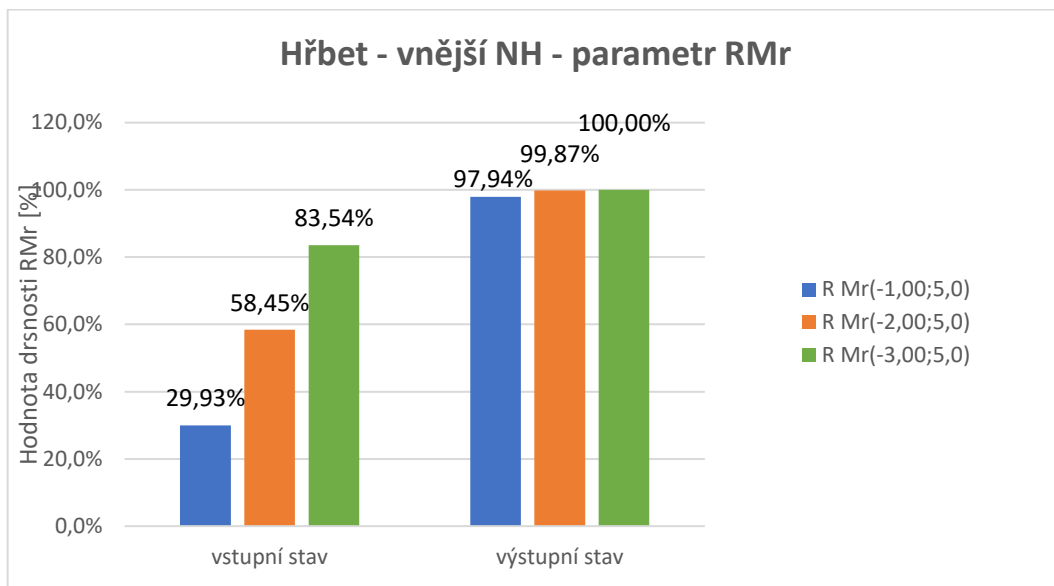
Tab. 6: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370

Parametr RMr [%]	Hřbet – vnější NH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	25,5385	97,7215	53,6213	100,0000	76,4154	100,0000
lopatka 4	25,5387	99,2660	47,7090	100,0000	69,9087	100,0000
lopatka 7	37,0314	99,6483	75,8430	100,0000	95,6835	100,0000
lopatka 10	32,2436	98,3650	57,5915	99,8619	86,9766	100,0000
lopatka 13	31,2130	91,4850	55,5741	99,2438	85,7413	100,0000
lopatka 16	32,5669	99,1082	67,1478	100,0000	93,2328	100,0000
lopatka 19	25,3740	100,0000	51,6483	100,0000	76,8176	100,0000
minimum	25,3740	91,4850	47,7090	99,2438	69,9087	100,0000
maximum	37,0314	100,0000	75,8430	100,0000	95,6835	100,0000
průměr	29,9294	97,9420	58,4479	99,8722	83,5394	100,0000

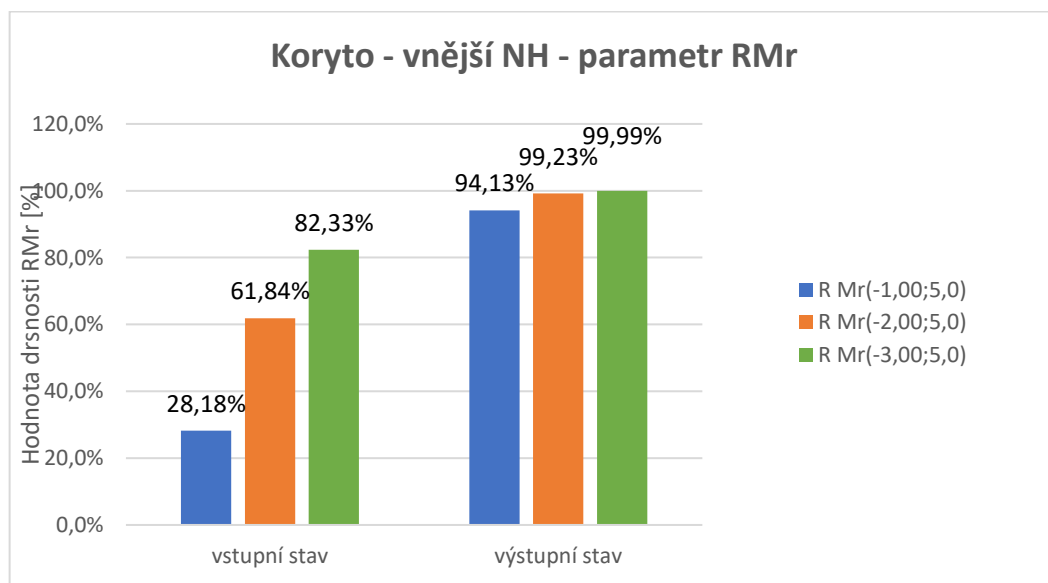
Tab. 7: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 370

Parametr RMr [%]	Koryto – vnější NH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	29,8358	90,6723	64,9824	99,9265	91,6998	100,0000
lopatka 4	34,7307	98,4064	68,8734	100,0000	93,5049	100,0000
lopatka 7	21,6632	98,8108	73,0528	100,0000	92,8188	100,0000
lopatka 10	31,9996	95,7321	76,7158	100,0000	93,7674	100,0000
lopatka 13	30,3748	99,5355	66,4445	100,0000	90,1889	100,0000
lopatka 16	26,4545	91,2974	46,4782	96,2606	62,9348	99,9125
lopatka 19	22,2153	84,4734	36,3453	98,4117	51,3999	100,0000
minimum	21,6632	84,4734	36,3453	96,2606	51,3999	99,9125
maximum	34,7307	99,5355	76,7158	100,0000	93,7674	100,0000
průměr	28,1820	94,1326	61,8418	99,2284	82,3306	99,9875

Vstupní naměřené hodnoty na obrázku 37 pro RMr (-1,00;5,0) se pohybovaly kolem 30 %, ale výstupní hodnoty razantně stouply a přiblížily se ke 100 %. To znamená, že materiálový podíl se jeví jako ideální ukazatel pro hodnocení leštěného povrchu v kombinaci s parametrem Ra či Rz. Dále z obrázků 37 a 38 vyplývá, že u hřbetu byly výstupní hodnoty materiálového podílu lepší než u koryta, což mohlo být způsobeno tvarem lopatek v části koryta, tudíž abrazivo hůře proudilo kolem lopatek.



Obr. 37: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370



Obr. 38: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370

Při porovnání hodnot vnější NH v tabulce 6, 7 a vnitřní OH v tabulce 8, 9 lze sledovat, že ačkoliv vstupní hodnoty před leštěním byly u vnitřní NH podstatně nižší, tak výstupní hodnoty materiálového podílu dosahovaly 100 %. Na druhou stranu z naměřených hodnot v tabulkách 6, 7, 8 a 9 zase vyplývá, že leštící médium hůře proudilo mezi lopatkovými plochy u vnitřní OH oproti vnější NH, kde byly výstupní hodnoty lepší.

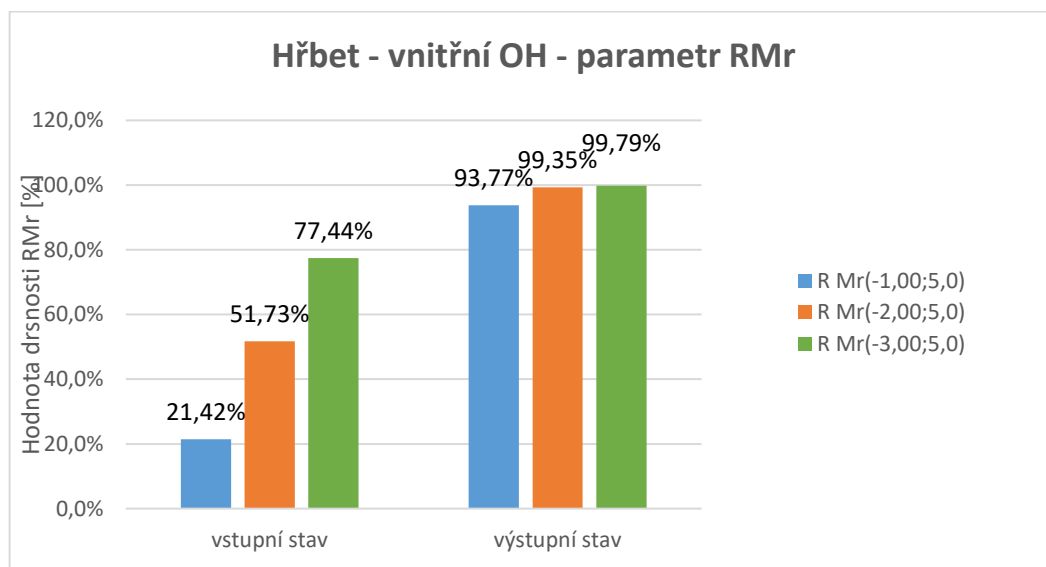
Tab. 8: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 370

Parametr RMr [%]	Hřbet – vnitřní OH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	14,5800	89,6114	51,0500	99,8237	82,6700	100,0000
lopatka 4	21,0118	99,9117	53,0809	100,0000	84,0318	100,0000
lopatka 7	36,9918	95,0536	72,0081	100,0000	94,0476	100,0000
lopatka 10	22,2251	96,2093	57,2051	100,0000	86,5050	100,0000
lopatka 13	10,5095	99,6068	39,0504	100,0000	72,9136	100,0000
lopatka 16	22,5006	89,5722	43,8773	98,8197	60,5457	99,8109
lopatka 19	22,1344	86,4593	45,8129	96,8260	61,3942	98,6849
minimum	10,5095	86,4593	39,0504	96,8260	60,5457	98,6849
maximum	36,9918	99,9117	72,0081	100,0000	94,0476	100,0000
průměr	21,4213	93,7749	51,7268	99,3528	77,4446	99,7851

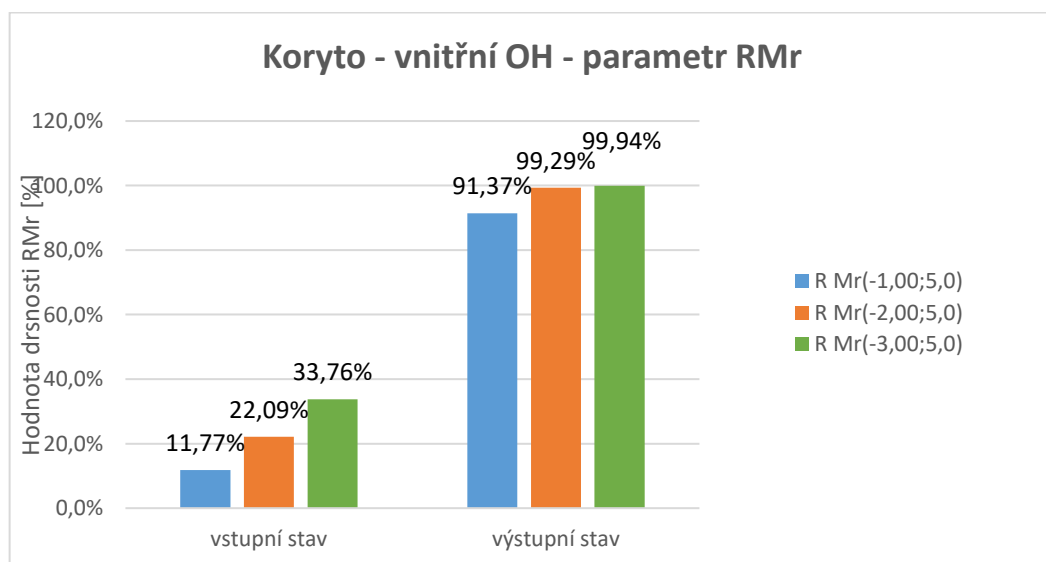
Tab. 9: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 370

Parametr RMr [%]	Koryto – vnitřní OH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	13,3501	99,3787	27,6070	100,0000	44,2522	100,0000
lopatka 4	9,7112	98,6375	18,4872	100,0000	29,4481	100,0000
lopatka 7	12,5709	99,8689	23,8064	100,0000	34,1790	100,0000
lopatka 10	12,7120	82,4142	22,4298	99,1148	36,4781	100,0000
lopatka 13	10,5453	98,4739	17,6998	100,0000	23,3469	100,0000
lopatka 16	12,1335	91,5986	22,3244	100,0000	35,0710	100,0000
lopatka 19	11,3867	69,1907	22,2963	95,9470	33,5683	99,6117
minimum	9,7112	69,1907	17,6998	95,9470	23,3469	99,6117
maximum	13,3501	99,8689	27,6070	100,0000	44,2522	100,0000
průměr	11,7728	91,3661	22,0930	99,2945	33,7634	99,9445

Na obrázku 39 a 40 lze vidět, že u hřbetu a koryta vnitřní OH bylo dosaženo podobných výsledků. Jediným rozdílem byl výstupní stav u RMr (-1,00;5,0), který se u hřbetu přiblížil 94 % na rozdíl od koryta, kde materiálový podíl byl 91,37 %, což můžeme pozorovat na obrázku 39 a 40. V tabulce 9 lze sledovat, že tato odchylka mohla být způsobena horším vstupním stavem již před leštěním. I po těchto rozdílech se materiálový podíl jeví jako nejvhodnější parametr pro vyhodnocení leštěného povrchu.



Obr. 39: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 370



Obr. 40: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 370

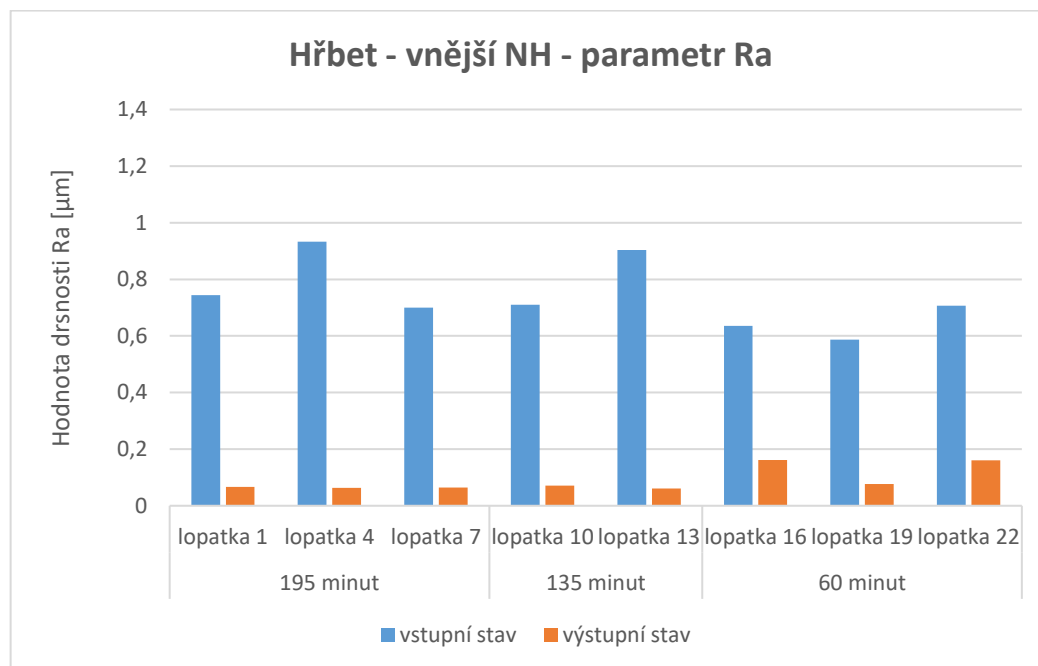
6.6 Vyhodnocení dílu 167 – kolo 2. stupně

Při leštění dílu 167 bylo lopatkové kolo umístěno náběžnou hranou dolů. Blisk byl rozdělen na tři segmenty. Nejprve byl leštění vystaven jeden segment a další byly postupně odjímány. Bliskem bylo vždy pootočeno proti směru hodinových ručiček o výseč segmentu. Nejprve byly leštěny lopatky 1 až 8 po dobu 60 minut. Následně se odkryly lopatky 9 až 14, kde leštění trvalo dalších 75 minut. Jako poslední byly k procesu leštění přidané zbylé lopatky 15 až 23 s časem leštění 60 minut. Celkový proces leštění tedy trval 195 minut. Z tabulky 10 naměřených hodnot R_a lze vidět, že u hřbetu vnější NH měl čas leštění jednotlivých lopatek vliv na výsledný povrch. Na obrázku 41 a 42 u lopatek 1 až 7 byl patrně větší rozdíl mezi vstupním a výstupním stavem, kde leštění trvalo celých 195 minut. Naopak u lopatek 16 až 22 byl rozdíl mezi vstupním a výstupním stavem menší, a to v průměru o $0,5 \mu\text{m}$. To bylo nejspíš způsobené tím, že tyto lopatky byly v procesu leštění pouze 60 minut. V tabulce 10 můžeme pozorovat, že podobný princip zafungoval i u koryta vnější NH. Výstupní požadovaná drsnost $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ byla s přehledem dosažena skoro u všech lopatek, neboť průměrná drsnost R_a byla u hřbetu $0,091 \mu\text{m}$ a u koryta $0,181 \mu\text{m}$.

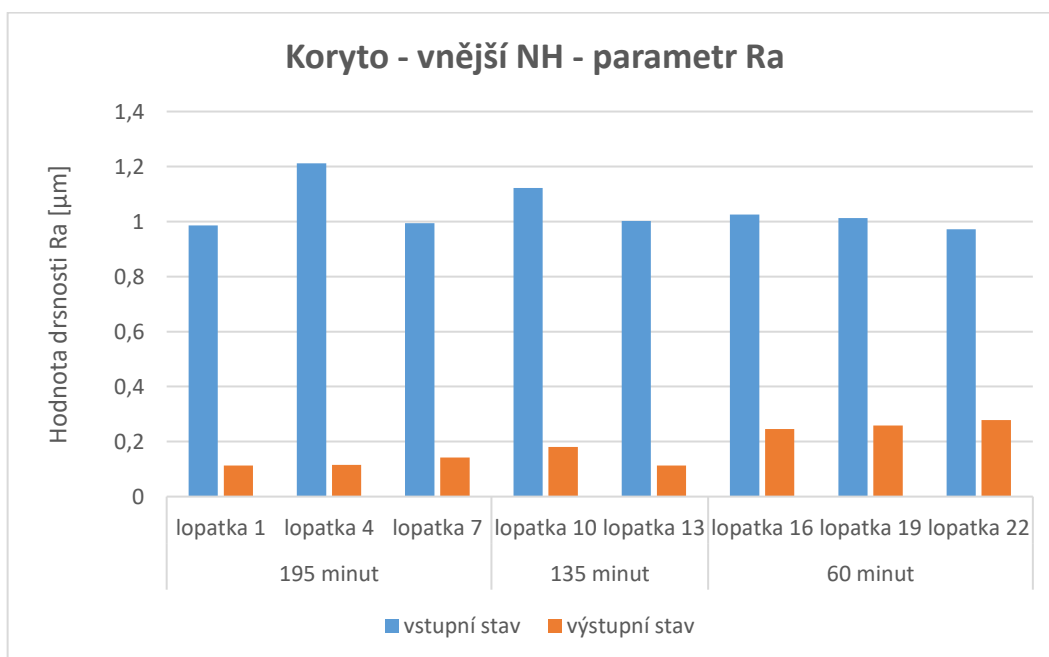
Tab. 10: Naměřené hodnoty R_a – Hřbet/Koryto vnější NH, díl 167

Parametr $R_a [\mu\text{m}]$	Hřbet – vnější NH			Koryto – vnější NH		
	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl
lopatka 1	0,744	0,067	0,677	0,986	0,113	0,873
lopatka 4	0,933	0,063	0,87	1,212	0,115	1,097
lopatka 7	0,7	0,064	0,636	0,994	0,142	0,852
lopatka 10	0,71	0,071	0,639	1,122	0,181	0,941
lopatka 13	0,904	0,061	0,843	1,002	0,113	0,889
lopatka 16	0,636	0,162	0,474	1,026	0,246	0,78
lopatka 19	0,587	0,077	0,51	1,013	0,258	0,755
lopatka 22	0,707	0,161	0,546	0,972	0,278	0,694
minimum	0,587	0,061	0,474	0,972	0,113	0,694
maximum	0,933	0,162	0,87	1,212	0,278	1,097
průměr	0,740	0,091	0,649	1,041	0,181	0,860

Z obrázku 41 a 42 vyplývalo, že čas leštění jednotlivých lopatek měl odlišný vliv na každou lopatku. Sice pořád platilo, že čím déle leštění trvalo, tím byly lepší hodnoty Ra, ale například u lopatky 16 na obrázku 41 se tento jev neprojevil, protože hodnota Ra se zvedla přibližně o 0,1 μm na 0,162 μm a u lopatky 19 zase klesla na 0,77 μm , i když leštění trvalo stejnou dobu. Mohlo to být způsobené nevýhodnou pozicí lopatky 16.



Obr. 41: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnější NH, díl 167



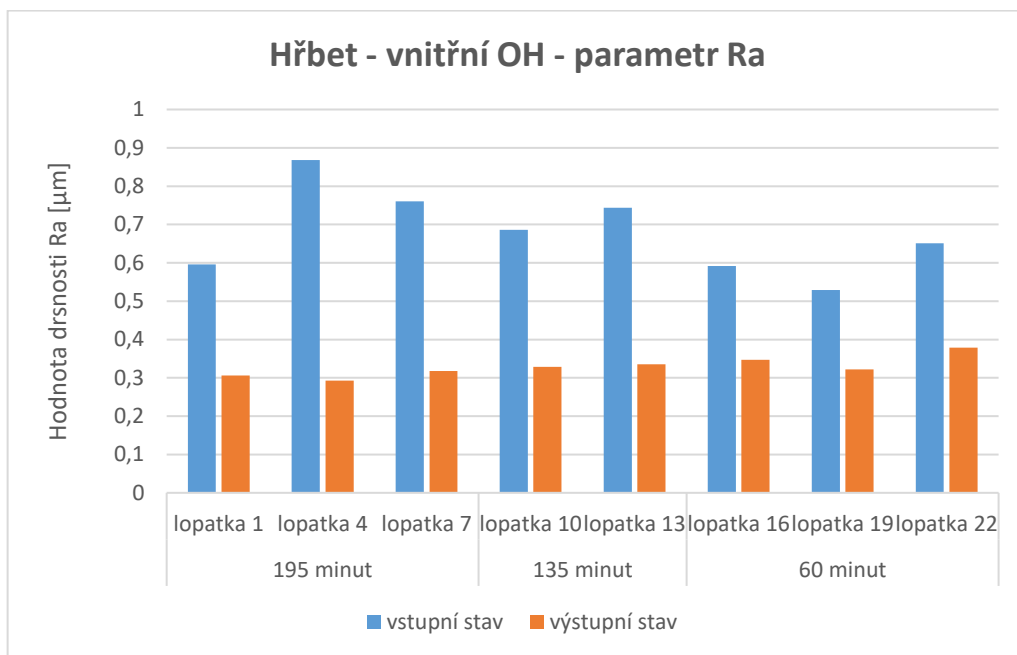
Obr. 42: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnější NH, díl 167

Po zhodnocení naměřených hodnot v tabulce 11 pro hřbet a koryto vnitřních OH bylo možné sledovat, že výsledná drsnost Ra je v průměru o 0,15 μm větší než u vnější NH. Pravděpodobně je to způsobeno špatně proudícím médiem, které se na vnitřní OH dostávalo obtížněji než na vnější NH. Dále bylo možné v tabulce 11 u vnitřní OH pozorovat to, co se potvrdilo ve výše uvedených vyhodnoceních, a to, že délka leštění lopatek měla minimální vliv na výsledné hodnoty Ra.

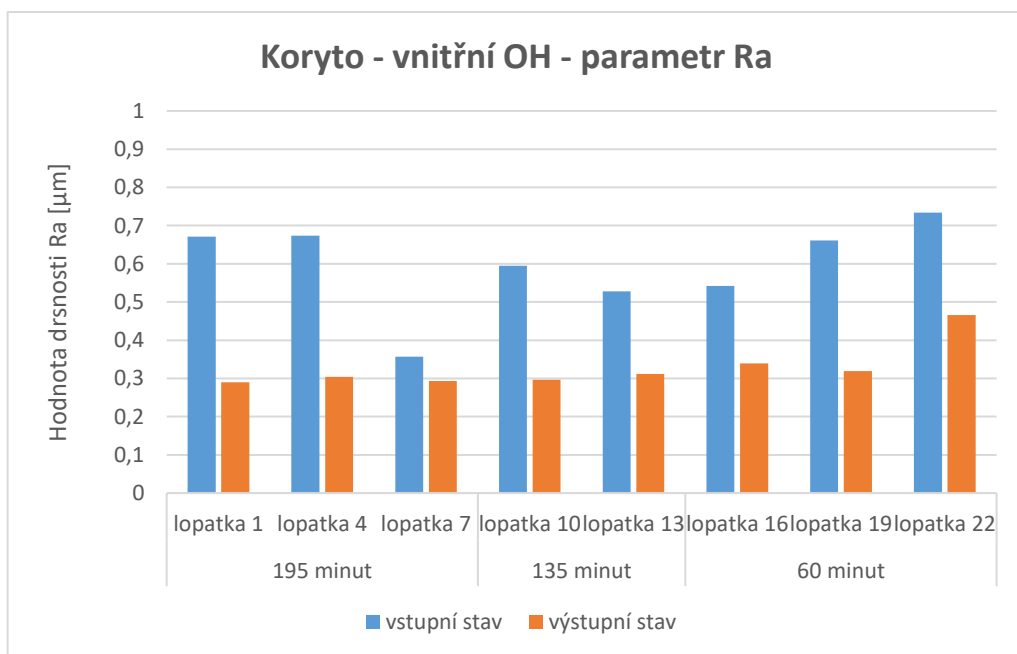
Tab. 11: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet/Koryto vnitřní OH, díl 167

Parametr Ra [μm]	Hřbet – vnitřní OH			Koryto – vnitřní OH		
	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl	vstupní stav	výstupní stav	rozdíl
lopatka 1	0,596	0,306	0,29	0,671	0,29	0,381
lopatka 4	0,868	0,293	0,575	0,674	0,304	0,37
lopatka 7	0,76	0,318	0,442	0,357	0,293	0,064
lopatka 10	0,686	0,329	0,357	0,595	0,297	0,298
lopatka 13	0,744	0,335	0,409	0,528	0,312	0,216
lopatka 16	0,592	0,347	0,245	0,542	0,339	0,203
lopatka 19	0,529	0,322	0,207	0,661	0,319	0,342
lopatka 22	0,651	0,379	0,272	0,734	0,466	0,268
minimum	0,529	0,293	0,207	0,357	0,29	0,064
maximum	0,868	0,379	0,575	0,734	0,466	0,381
průměr	0,678	0,329	0,350	0,595	0,328	0,268

Na obrázku 43 a 44 lze vidět, že výstupní hodnoty na vnitřních OH byly poněkud vyšší, než na vnějších hranách, což lze vidět na obrázku 41 a 42. Jak můžeme pozorovat z obrázku 43 i z obrázku 44, tak u žádné lopatky nebylo dosaženo požadované drsnosti $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ ani po době 195 minut. Nejspíše to bylo způsobené špatným prouděním abraziva v mezi lopatkovém prostoru, protože se jednalo o vnitřní hranu.



Obr. 43: Naměřené hodnoty R_a – Hřbet vnitřní OH, díl 167



Obr. 44: Naměřené hodnoty R_a – Koryto vnitřní OH, díl 167

V tabulce 12 a 13 následovalo vyhodnocení a porovnání materiálového podílu RMr. Z naměřených hodnot materiálového podílu pro vnější NH hřbetu a koryta se jeví volba tohoto parametru pro hodnocení leštěného povrchu jako výhodná. To potvrzuje i závěr z předchozího experimentu. Již u RMr (-1,00;5,0) v tabulce 12 pro hřbet byly patrné rozdíly mezi vstupním a výstupním stavem jednotlivých lopatek, kde průměrný výstupní materiálový podíl dosahoval přes 99 %, což bylo zlepšení oproti původnímu materiálovému podílu o 58 %. Podobná situace se opakovala i u koryta, kde průměrný vstupní materiálový podíl byl 17,2 % a průměrný výstupní materiálový podíl dosahoval necelých 97 %, což můžeme vidět v tabulce 13. Se zvětšující se hloubkou měření se výsledný materiálový podíl zvyšoval většinou až do 100 %. To bude mít přínosný efekt na plynulost obtékání proudu vzduchu okolo lopatek. Dále to vede ke zvýšení výkonu motoru, aniž by se muselo konstrukčně upravovat celé lopátkové kolo, protože při 100 % materiálovém podílu je povrch téměř ideální a minimálně na něm vznikají vady.

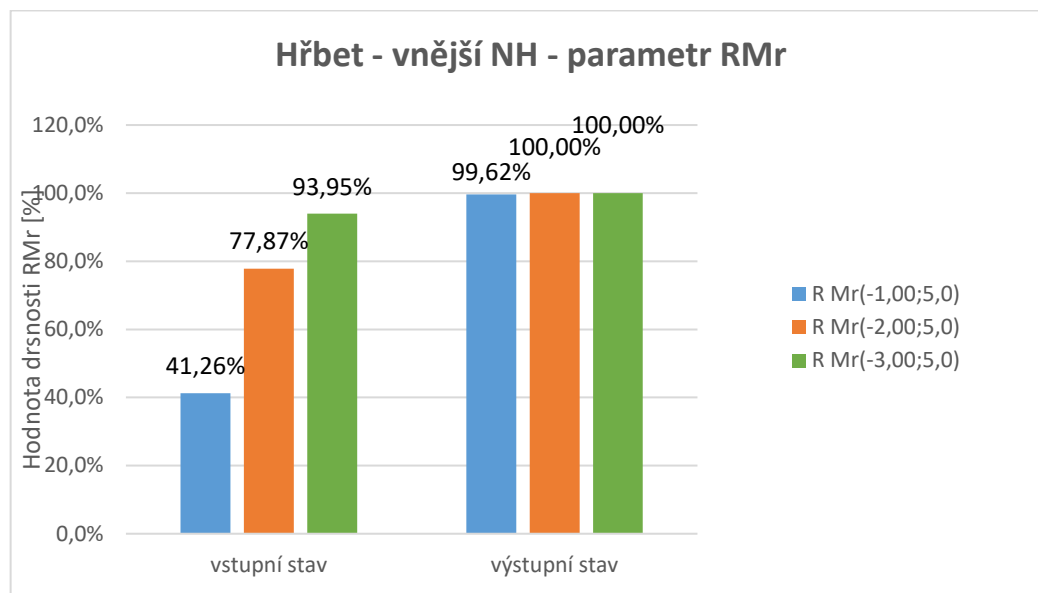
Tab. 12: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 167

Parametr RMr [%]	Hřbet – vnější NH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	47,4914	100,0000	80,6462	100,0000	95,1463	100,0000
lopatka 4	34,0774	100,0000	67,0192	100,0000	85,9553	100,0000
lopatka 7	39,2319	100,0000	79,9176	100,0000	96,1005	100,0000
lopatka 10	37,5024	100,0000	79,1413	100,0000	95,2574	100,0000
lopatka 13	23,5103	100,0000	60,2865	100,0000	85,4443	100,0000
lopatka 16	55,7313	98,7107	86,8970	100,0000	98,6311	100,0000
lopatka 19	53,1382	100,0000	90,0616	100,0000	99,1720	100,0000
lopatka 22	39,3930	98,2346	78,9678	99,9624	95,9068	100,0000
minimum	23,5103	98,2346	60,2865	99,9624	85,4443	100,0000
maximum	55,7313	100,0000	90,0616	100,0000	99,1720	100,0000
průměr	41,2595	99,6182	77,8672	99,9953	93,9517	100,0000

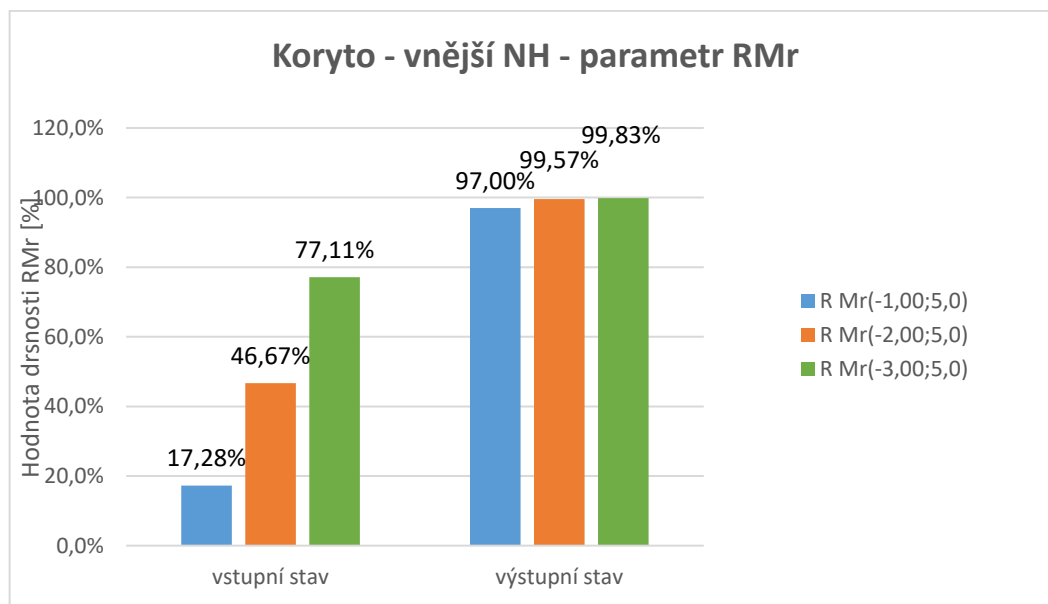
Tab. 13: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 167

Parametr RMr [%]	Koryto – vnější NH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	29,6636	100,0000	64,0934	100,0000	84,8498	100,0000
lopatka 4	12,3157	99,7123	27,4346	99,8499	61,3406	99,9750
lopatka 7	13,0633	99,7624	32,2804	100,0000	74,2875	100,0000
lopatka 10	15,2528	97,5830	40,1737	99,8999	74,5660	100,0000
lopatka 13	14,3322	99,8749	44,3344	100,0000	78,3347	100,0000
lopatka 16	22,7413	93,3479	60,3012	99,1745	82,7589	99,6873
lopatka 19	13,2292	94,0894	48,5489	98,8697	79,0106	99,3747
lopatka 22	17,6323	91,6100	56,1914	98,7475	81,7532	99,5933
minimum	12,3157	91,6086	27,4346	98,7475	61,3406	99,3747
maximum	29,6636	100,0000	64,0934	100,0000	84,8498	100,0000
průměr	17,2788	96,9973	46,6698	99,5677	77,1127	99,8288

Na obrázku 46 lze sledovat, že u koryta vnější NH byly výstupní hodnoty materiálového podílu nižší, a to z důvodu složitějšího tvaru plochy lopatky ze strany koryta. Tím pádem se leštící médium do daných míst dostávalo s většími potížemi než u přístupnější plochy hřbetu.



Obr. 45: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 167



Obr. 46: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 167

Při zhodnocení naměřených hodnot u hřbetu a koryta v tabulce 12, 13, 14 a 15 byla vidět podobnost výstupního materiálového podílu jak u vnější NH, tak u vnitřní OH.

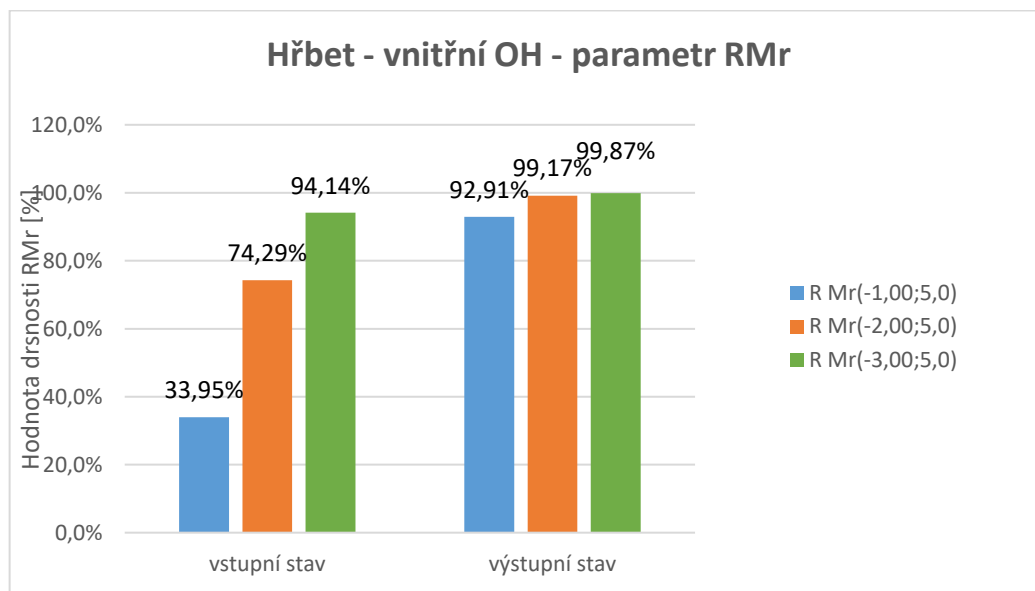
Tab. 14: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 167

Parametr RMr [%]	Hřbet – vnitřní OH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	28,6519	99,9373	66,0417	100,0000	89,0529	100,0000
lopatka 4	38,4277	95,3196	69,5276	99,3099	88,7814	100,0000
lopatka 7	49,2004	100,0000	89,3480	100,0000	99,4955	100,0000
lopatka 10	43,6762	98,9621	81,7613	100,0000	97,5035	100,0000
lopatka 13	26,3266	98,8241	72,4158	100,0000	95,3896	100,0000
lopatka 16	24,9729	60,6217	63,7623	94,9224	92,4089	98,9462
lopatka 19	36,0517	94,1292	80,0722	100,0000	96,2124	100,0000
lopatka 22	24,3030	95,5155	71,4209	99,1219	94,2817	100,0000
minimum	24,3030	60,6217	63,7623	94,9224	88,7814	98,9462
maximum	49,2004	100,0000	89,3480	100,0000	99,4955	100,0000
průměr	33,9513	92,9137	74,2937	99,1693	94,1407	99,8683

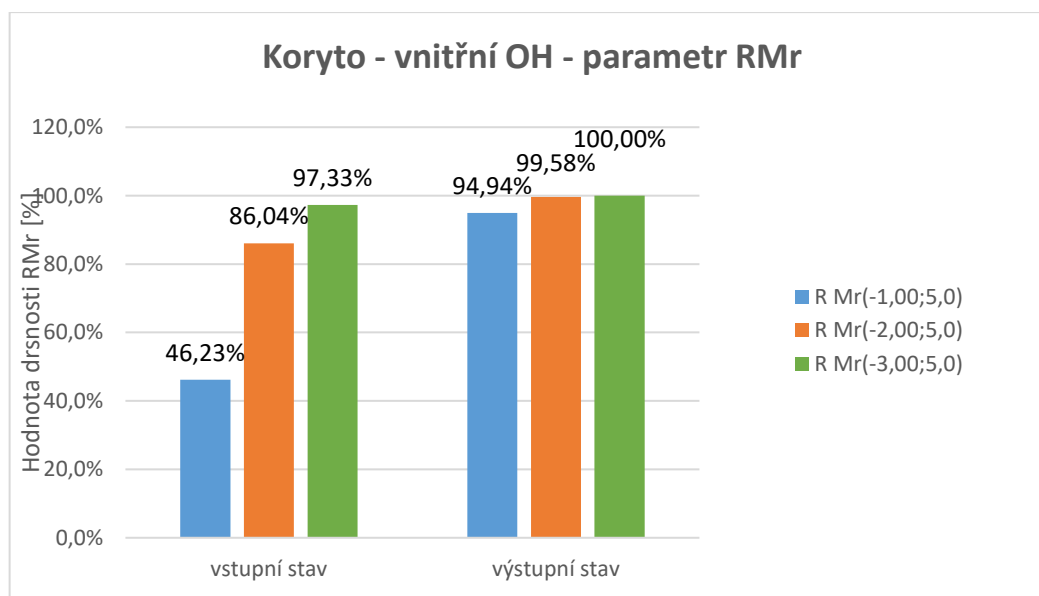
Tab. 15: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167

Parametr RMr [%]	Koryto – vnitřní OH					
	R Mr(-1,00;5,0)		R Mr(-2,00;5,0)		R Mr(-3,00;5,0)	
	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav	vstupní stav	výstupní stav
lopatka 1	42,3685	99,8698	82,3412	100,0000	96,4928	100,0000
lopatka 4	28,9460	99,5924	75,6940	100,0000	96,3585	100,0000
lopatka 7	79,5253	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
lopatka 10	45,2510	100,0000	86,3227	100,0000	97,7079	100,0000
lopatka 13	47,4953	99,8552	92,2999	100,0000	99,7433	100,0000
lopatka 16	46,4195	92,8804	91,3041	99,8266	99,6049	100,0000
lopatka 19	42,9018	97,0414	83,0162	100,0000	95,1822	100,0000
lopatka 22	36,8940	70,2902	77,3684	96,8491	93,5233	100,0000
minimum	28,9460	70,2902	75,6940	96,8491	93,5233	100,0000
maximum	79,5253	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
průměr	46,2252	94,9412	86,0433	99,5845	97,3266	100,0000

Z toho tedy vycházela otázka, proč jsou hodnoty podobné, když se jedná o dvě různé hrany, a navíc vždy u vnitřní hrany byly hodnoty většinou horší. Mohlo to být způsobeno délkou procesu leštění, které bylo natolik dlouhé, že se vnitřní OH vyrovnala vnější NH. Proces leštění trval u toho experimentu 195 minut.



Obr. 47: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167



Obr. 48: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167

7 Závěr

Tato práce se zabývala definováním parametrů drsnosti pro kvalitativní hodnocení leštěných titanových lopatek leteckého motoru. Pomocí norem byla popsána teorie profilu povrchu a přehled měřících metod a systémů. Dále následovalo základní přiblížení vlastností titanu a jeho použití v letectví. Po důkladném seznámení se všemi důležitými teoretickými informacemi mohla proběhnout experimentální část.

Experimentální část obsahovala měření a následné vyhodnocení leštěných titanových lopatek podle vhodně zvolených parametrů profilu. Měření profilu povrchu se realizovalo na přístroji Mahr LD 120. Pro experiment byla zvolena lopatková kola číslo 370 a 167. Díl 370 bylo lopatkové kolo 1. stupně a díl číslo 167 bylo lopatkové kolo 2. stupně. Po výběru měřícího snímače a po kalibraci přístroje se lopatkové kolo muselo správně umístit do polohovacího svěráku, aby mohly být zaznamenány vybrané hodnoty. Mezi vybranými hodnotami byly parametry R_a , R_z , R_{max} , R_{Mr} a W_a . Po doměření povrchu vybraných lopatek a zhodnocení naměřených parametrů profilu byly vybrány dva parametry. Jelikož výrobce lopatkových kol hodnotí povrch pomocí parametru R_a , pracovalo se dále s tímto parametrem. Parametr R_a je ale pouze střední aritmetická hodnota profilu povrchu a tím je jeho vypovídací hodnota značně zkreslena, z toho důvodu jeví se jako vhodný doplňkový parametr materiálový podíl R_{Mr} .

U lopatkového kola 370 (1. stupně) byla při leštění použita pozice nejdříve náběžnou hranou dolů a ve druhém cyklu náběžnou hranou nahoru. Orientace náběžnou hranou dolů byla aplikována pro lopatky 1 až 11, s tím že lopatky 12 až 20 byly zakryty. Následovalo otočení lopatkového kola na pozici náběžnou hranou nahoru, kde byly leštěné lopatky 12 až 20 a lopatky 1 až 11 byly zakryty. Požadované hodnoty drsnosti $R_a = 0,2 \mu m$ byly dosaženy už při prvním cyklu, kdy byla náběžná hrana umístěna dolů. Na určitých lopatkách se objevují menší výchyly, které nedosáhly požadované hodnoty. To může být způsobeno například rýhou na povrchu lopatky způsobenou předchozí technologickou úpravou. Z naměřených hodnot R_a vyplývá, že orientace náběžné hrany lopatkového kola při procesu leštění výsledný povrch neovlivňuje, protože rozdíly vstupních a výstupních hodnot jsou minimální. V další fázi byly naměřené lopatky

hodnoceny pomocí materiálového podílu RMr. Vyhodnocení bylo provedeno pro RMr (-1,00;5,0), RMr (-2,00;5,0), RMr (-3,00;5,0). První číslo uvedené v závorce označuje hloubku povrchu v μm , ve které bylo měření provedeno. Z toho vyplývá, že hodnocení povrchu probíhalo v hloubkách 1 μm , 2 μm a 3 μm . Při porovnání hodnot vnější NH a vnitřní OH lze pozorovat, že ačkoliv vstupní hodnoty před leštěním byly u vnitřní NH podstatně nižší, tak výstupní hodnoty materiálového podílu dosahovaly téměř 100 %. Na druhou stranu z naměřených hodnot bylo vidět, že leštící médium hůře proudilo mezi plochami lopatek u vnitřní OH oproti vnější NH, kde byly výstupní hodnoty lepší.

Lopátkové kolo 167 (2. stupně) bylo při procesu leštění umístěno náběžnou hranou dolů. Blisk byl rozdělen na tři segmenty. Nejprve byl leštění vystaven jeden segment a další byly postupně odjímány. Bliskem bylo vždy pootočeno proti směru hodinových ručiček o výseč segmentu. Nejdéle byly leštění vystaveny lopatky 1 až 8, a to 195 minut. Lopatky 9 až 14 byly leštěny 135 minut a nejméně času (60 minut) v leštícím procesu strávily lopatky 15 až 23. Celkový proces leštění tedy trval 195 minut. Z naměřených hodnot R_a lze vidět, že u hřbetu vnější NH měl čas leštění jednotlivých lopatek vliv na výsledný povrch. Největší rozdíl mezi vstupním a výstupním stavem byl pro lopatky 1 až 8 a naopak nejmenší rozdíl byl vidět u lopatek 15 až 23. Nejpravděpodobněji je to způsobeno tím, že lopatky 1 až 8 byly leštěny 195 minut a lopatky 15 až 23 pouze 60 minut. Z dalších grafických závislostí ale občas vyplynulo, že délka leštění neměla stejný vliv na všechny lopatky. Například u hřbetu vnější NH lze sledovat, že i když lopatky 16 a 19 byly leštěny stejně dlouho, tak rozdíly mezi vstupními a výstupními hodnotami byly odlišné. Dále následovalo vyhodnocení a porovnání materiálového podílu RMr. Z naměřených hodnot materiálového podílu pro vnější NH hřbetu a koryta se jeví volba tohoto parametru pro hodnocení leštěného povrchu jako výhodná. Již u RMr (-1,00;5,0) pro hřbet byly patrné rozdíly mezi vstupním a výstupním stavem jednotlivých lopatek, kde průměrný výstupní materiálový podíl dosahoval přes 99 %, což bylo zlepšení oproti původnímu materiálovému podílu o 58 %. Podobná situace se opakovala i u koryta. Jediný veliký rozdíl bylo možné pozorovat při porovnání vnější NH a vnitřní OH. Je zřetelné, že vnitřní OH měli po leštění znatelně horší povrch. Nejpravděpodobněji to bylo způsobené špatným prouděním leštícího média na vnitřní hranách lopatek.

Výstupní hodnoty u obou lopatkových kol se výrazně lišily. Nejspíš je to způsobeno tím, že lopatkové kolo 370 má celkem 23 listů lopatek a lopatkové kolo 167 má pouze 21 lopatek. Z toho jde usoudit, že lopatkové kolo s vyšším počtem lopatkových listů mělo horší povrch po leštění, neboť mělo menší prostor mezi lopatkami, kde probíhalo proudění abraziva.

Výsledkem práce bylo hodnocení povrchu lopatek pomocí parametru Ra, protože tento parametr se používá ve většině fyzikálních a chemických výpočtech a výrobce tímto parametrem hodnotí většinu součástí. Jedinou nevýhodou tohoto parametru je, že udává pouze střední aritmetickou hodnotu, tudíž by mohly být výsledné hodnoty zkreslovány. Z toho vyplynulo, že jsem musel zvolit ještě druhý parametr, který by doplnil parametr Ra a který by byl dostatečně citlivý pro kvalitativní hodnocení leštěného povrchu. Jako jediný vhodný doplňující parametr z výsledků měření vyplynul materiálový podíl povrchu. Důvodem je jeho citlivost i na menší změny v profilu povrchu. To potvrdily viditelné změny mezi stavem hodnoty materiálového podílu před a po procesu leštění lopatkových kol.

8 Literatura

- [1] Chudý, V., Palenčár, R., Kureková, E., Halaj M. *Meranie technických veličín*. Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1999, 688 s. ISBN 80-227-1275-3.
- [2] Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. 338 s.
- [3] Mikš, Antonín. *Aplikovaná optika 10: geometrická a vlnová optika*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 259 s. ISBN 80-010-2116-5.
- [4] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [5] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [6] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Český normalizační institut, 1999.
- [7] ČSN EN ISO 13565-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda: povrch mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 1: Filtrace a všeobecné podmínky měření*. Český normalizační institut, 1999
- [8] MahrSurf. *Parametry drnosti povrchu*. [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

[9] MB Calibr. *Měření drsnosti*. [online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>

[10] OLYMPUS. *Advanced Measurement Performance*. [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols4000/>

[11] TICHÁ, Š.; ADAMEC, J. *Návody do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 92 s.

[12] Elektronické učebnice. *Měřicí přístroje drsnosti*. [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>

[13] Vladimír Sedláček, Odvody, V., Ošťádal, B.: *Titan a jeho slitiny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. 205 s.

[14] NENÁHLO, Čeněk. *Měření vybraných geometrických veličin*. Praha: Česká metrologická společnost, 1999.

[15] MARTINÁK, Milan. *Kontrola a měření pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických*. Praha, 1989.

[16] *Struktura povrchu*. [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Struktura_povrchu

[17] Jurena, P.: *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2011. [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16302/jurena_2011_dp.pdf?sequence=1

[18] Taylor Hobson Ltd., *Cut-off a příručka měření povrchu*. [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: http://www.imeco-th.eu/Download/Clanky/TH_News_Cut-off.pdf

[19] C.J Tay, S.H Wang, C Quan, H.M Shang. *In situ surface roughness measurement using a laser scattering method*. [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401803011027>

[20] MahrSurf. Tastarm – *Datenblatt tracing arm data sheet*. [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://www.ems-benelux.com/wp_content/uploads/2012/04/MarSurf_UD120-LD120.pdf

[21] Drsnost povrchu dle DIN EN ISO. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>

9 Seznamy

9.1 Obrázky

Obr. 1: Schéma kontaktního snímání povrchu [12]	13
Obr. 2: Schéma indukčního snímače [12]	14
Obr. 3: Laserový snímač [12]	16
Obr. 4: Schéma CLA snímače [12]	17
Obr. 5: Porovnání profilu drsnosti kontaktní a bezkontaktní metodou [10]	18
Obr. 6: Vzhled povrchu [16]	19
Obr. 7: Skutečný profil povrchu [17]	20
Obr. 8: Obecný tvar povrchu [17]	20
Obr. 9: Schéma délek vyhodnocovaného profilu [21]	20
Obr. 10: Postup filtrace profilu povrchu [21]	23
Obr. 11: Hloubka profilu [8]	25
Obr. 12: Hloubka vlny [8]	26
Obr. 13: Hloubka drsnosti [8]	26
Obr. 14: Průměrná kvadratická hodnota drsnosti [8]	27
Obr. 15: Hloubka největší prohlubně [8]	27
Obr. 16: Výška největší špičky [8]	28
Obr. 17: Hloubka drsnosti [8]	28
Obr. 18: Základní hloubka drsnosti [8]	29
Obr. 19: Průměrná aritmetická hodnota drsnosti [8]	29
Obr. 20: Sklon posuzovaného profilu drsnosti [8]	30
Obr. 21: Strmost profilu drsnosti [8]	30
Obr. 22: Střední stoupání profilu [8]	31
Obr. 23: Veličiny nosného podílu [8]	31
Obr. 24: Střední vzdálenost rýh [8]	32
Obr. 25: Materiálový podíl drsnosti [8]	33
Obr. 26: Počet špiček [8]	33
Obr. 27: Základní rozdělení chyb [14] [15]	35

Obr. 28: Přístroj Mahr LD 120	41
Obr. 29: Snímací hrot MarSurf LDB 4-10-2	42
Obr. 30: Základní výkres snímacího hrotu [20]	42
Obr. 31: Hřbet lopatky	43
Obr. 32: Koryto lopatky	43
Obr. 33: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnější NH, díl 370	46
Obr. 34: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnější NH, díl 370	46
Obr. 35: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnitřní OH, díl 370	48
Obr. 36: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnitřní OH, díl 370	48
Obr. 37: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370	50
Obr. 38: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370	50
Obr. 39: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 370	52
Obr. 40: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 370	52
Obr. 41: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnější NH, díl 167	54
Obr. 42: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnější NH, díl 167	54
Obr. 43: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet vnitřní OH, díl 167	56
Obr. 44: Naměřené hodnoty Ra – Koryto vnitřní OH, díl 167	56
Obr. 45: Průměrné hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 167	59
Obr. 46: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 167	59
Obr. 47: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167	61
Obr. 48: Průměrné hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167	61

9.2 Tabulky

Tab. 1: Volba mezní vlnové délky periodických a aperiodických profilů [8]	21
Tab. 2: Rozdělení základních parametrů profilu [4]	24
Tab. 3: Technické parametry snímacího hrotu MarSurf LDB 4-10-2 [20].....	42
Tab. 4: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet/Koryto vnější NH, díl 370	45
Tab. 5: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet/Koryto vnitřní OH, díl 370	47
Tab. 6: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 370.....	49
Tab. 7: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 370	49
Tab. 8: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 370	51
Tab. 9: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 370	51
Tab. 10: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet/Koryto vnější NH, díl 167	53
Tab. 11: Naměřené hodnoty Ra – Hřbet/Koryto vnitřní OH, díl 167	55
Tab. 12: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnější NH, díl 167	58
Tab. 13: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnější NH, díl 167	58
Tab. 14: Naměřené hodnoty RMr – Hřbet vnitřní OH, díl 167	60
Tab. 15: Naměřené hodnoty RMr – Koryto vnitřní OH, díl 167	60

9.3 Zkratky

ČSN – česká norma

ISO – mezinárodní organizace pro normalizaci

EN – evropská norma

2D – dvojrozměrný povrch (plocha)

3D – trojrozměrný povrch (plocha)

Pt – hloubka profilu

Wt – hloubka vlny

Rt – hloubka drsnosti

Ra – průměrná aritmetická hodnota drsnosti

Rq – průměrná kvadratická hodnota drsnosti

Rv – výška největší prohlubně

Rp – výška největší špičky

Rpm' – střední hodnota z více jednotlivých měřících drah

Rz, Rmax – hloubka drsnosti

RZi' – dílčí hloubka drsnosti

R3z – základní hloubka drsnosti

R3zi – jednotlivá hloubka drsnosti

Rsk – sklon posuzovaného profilu drsnosti

Rku – strmost profilu drsnosti

Rmr – materiálový podíl profilu drsnosti

Rk – jádrová hloubka drsnosti

Rpk – redukováná výška špičky

Rvk – redukováná hloubka rýh

Mr1 – nejmenší materiálový podíl jádrového profilu

Mr2 – největší materiálový podíl jádrového profilu

Rsm – střední vzdálenost rýh

RPc – počet špiček

RΔq – střední stoupání profilu

λs – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu

λc – filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti

λ_f – filtr určující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu

NH – náběžná hrana

OH – odtoková hrana

μm – mikrometr

$^{\circ}\text{C}$ – stupně celsia

$\mu\Omega\text{ cm}$ – mikro ohm centimetr

$\text{cal/g } ^{\circ}\text{C}$ – kalorie na gram stupně celsia

cal/cm – kalorie na centimetr

g/cm^3 – gram na centimetr krychlový

$\text{cm/cm } ^{\circ}\text{C}$ – centimetr na centimetr stupně celsia

kg/mm^2 – kilogram na milimetr čtvereční

kg – kilogram

mm – milimetr

9.4 Přílohy

- CD
- Naměřené výsledky lopatkových kol